



Daniel Cândio Guimarães

Novas Tecnologias de Produção de Biocombustíveis: Potencial para o Sistema Energético Português

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, perfil Gestão e Sistemas Ambientais

Orientador: Maria Júlia Fonseca de Seixas, Professora
da FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Francisco Ferreira
Arguente: Prof. Doutor Francisco Gírio
Vogal: Prof. Doutora Maria Júlia Fonseca de Seixas



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Março 2013

Novas Tecnologias de Produção de Biocombustíveis: Potencial para o Sistema Energético Português.

© Daniel Cândio Guimarães

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria em primeiro lugar de agradecer à minha professora Maria Júlia Fonseca de Seixas pela total disponibilidade em ajudar-me na concretização desta dissertação, pela transmissão dos seus conhecimentos e por todos os incentivos que foram de extrema importância, e de agradecer aos elementos do CENSE (Center for Environmental and Sustainability Research) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL, João Pedro Gouveia e Luís Dias também pela disponibilidade e por todas as ajudas que me deram.

Em segundo lugar agradeço à minha família, nomeadamente, ao meu pai, Henrique Manuel Alonso da Costa Guimarães por toda a sabedoria que me transmitiu ao longo da vida e, em especial, durante a execução deste trabalho, à minha mãe, Helena Isabel dos Santos Câncio por toda a paciência, apoio totalmente incondicional e compreensão que me levaram a conseguir concretizar este estudo e finalmente ao meu irmão e sua namorada, André Câncio Guimarães e Rita Teixeira, por todo o companheirismo e amizade que partilhamos, essenciais para um bom estado de espírito na elaboração desta dissertação.

Por último, mas não os menos importantes, a todos os meus amigos que me ajudam a ter uma vida concretizada e saudável e a ter vontade de fazer este trabalho, seria uma lista interminável pelo que agradeço de uma forma geral e profunda aos amigos que conheci durante o meu percurso da faculdade e a todos os outros que conheci anteriormente, deixando um espaço especial para as três companheiras que fizeram a dissertação ao mesmo tempo que eu por puxarem por mim nas alturas mais importantes.

Ainda agradeço ao projecto HybCO₂ – *Hybrid approaches to assess economic, environmental and technological impacts of long term low carbon scenarios: The Portuguese case* (PTDC/AAC-CLI/105164/2008) financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia por ter facultado os cenários energéticos de longo prazo para Portugal.

RESUMO

A quase totalidade da energia global consumida vem dos combustíveis fósseis e o seu consumo tem vindo a aumentar exponencialmente nestas últimas décadas causando a depleção dos recursos de fósseis conhecidos e suscitando questões como problemas ambientais e, em particular, o das alterações climáticas. A mitigação destes problemas ambientais é uma das forças motrizes para a utilização da bioenergia em substituição dos combustíveis fósseis. Os biocombustíveis são uma forma de aproveitamento desta bioenergia para satisfazer as necessidades do sector dos transportes, que é responsável por cerca de um quinto das emissões de gases efeito de estufa (GEE) a nível global e cerca de um terço a nível europeu.

Os biocombustíveis tradicionais, biodiesel e etanol, provenientes de culturas alimentícias criaram uma polémica sobre competição do sector energético e o sector alimentar e as matérias-primas para a sua produção não são em grande medida competitivas com os combustíveis fósseis pelo que o desenvolvimento de novas tecnologias de produção de biocombustíveis está a ser alvo de interesse. Estes novos biocombustíveis, designados por biocombustíveis avançados, utilizam outras fontes de matérias-primas que têm a vantagem de não competir com outros sectores e ter melhores desempenhos ambientais, posto isto uma análise destas tecnologias é necessária para se avaliar sobre o seu potencial de implementação.

Nesta dissertação é feita uma análise do potencial das novas tecnologias de produção de biocombustíveis para o sistema energético português até 2050 através: i) da sistematização de algumas destas tecnologias emergentes, por exemplo a gasificação de biomassa; ii) da análise do potencial de disponibilidade de matéria-prima para produção de biocombustíveis, nomeadamente, os licores negros, a biomassa geral (culturas energéticas, resíduos agrícolas e resíduos florestais), os resíduos sólidos urbanos (RSU) e as algas; iii) da análise exploratória de cenários criados pelo modelo TIMES_PT, cenário base e cenário com a consideração das novas tecnologias de produção de biocombustíveis.

Constatou-se para Portugal um potencial de disponibilidade de matérias-primas em 2050 de 36,8 PJ anuais de biomassa, 10 PJ de RSU e 33,2 PJ de licores negros, não havendo informação disponível para o potencial de produção de algas dado o seu estado embrionário

A análise de cenários futuros do sistema energético português, considerando um tecto agressivo de emissões de gases com efeito de estufa até 2050, revelou resultados satisfatórios comparativamente ao cenário base (sem a consideração das novas tecnologias), nomeadamente com uma substituição total dos combustíveis fósseis em 2050 no sector dos transportes e com um consumo de bio Fischer-Tropsch diesel (bio-FTD) de 81 PJ anuais em 2050, que corresponde a 37% do total. A tecnologia custo-eficaz seleccionada pelo modelo foi a **gasificação da biomassa**, seguida da **gasificação dos licores negros** e da **gasificação dos RSU**. Estes resultados permitem antever um papel importante dos biocombustíveis avançados no futuro do sector dos transportes, sobretudo se considerarmos uma economia de baixo carbono para Portugal

Palavras-chave: Biocombustíveis avançados, novas tecnologias de produção, emissão de GEE, biorefinaria e cenários futuros.

ABSTRACT

The majority of the global consumed energy comes from fossil fuels and its consumption has been rising exponentially in the last decades causing the depletion of the known fossil resources and raising issues like environmental problems and, in particular, the climate change. The mitigation of these problems is one of the driving forces for the use of bioenergy in order to replace fossil fuels. The biofuels are an option for using this bioenergy for meeting the needs of the transportation sector, which is responsible for almost one fifth of the greenhouse gas (GHG) emissions at global level and one third at European level.

The traditional biofuels, biodiesel and ethanol, that come from food crops created a controversy on the competition of the energetic sector and the food sector and the feedstock for their production are not competitive in great extent with the fossil fuel therefore the development of new technologies of biofuel production is attracting interest. These new biofuels, referred as advanced biofuels, use other feedstock resources that have the advantage of not competing with other sectors and having better environmental performances, that said an analysis of this technologies is necessary in order to assess about their implementation potential.

In this dissertation an analysis of the new biofuel production technologies for the Portuguese energetic system until 2050 is made through: i) the systematization of some of these emerging technologies, for example the biomass gasification; ii) the analysis of the feedstock availability potential for the production of biofuels, particularly, the black liquors, general biomass (energy crops, agricultural residues and forest residues), municipal solid waste (MSW) and algae; iii) the exploratory analysis of scenarios created by the model TIMES_PT, base scenarios and the scenario with the consideration of the new biofuel production technologies

It was found for Portugal that the feedstock availability potential in 2050 is **36,8 PJ** of biomass annually, **10 PJ** of MSW and **33,2 PJ** of black liquors, and that there is missing information for the algae production potential due to its embryonic status.

The analysis of the Portuguese energetic system future scenarios, considering an aggressive reduction of greenhouse gases until 2050, revealed satisfying results compared with the base scenario (without the consideration of the new technologies), particularly with a total substitution of fossil fuels in 2050 in the transportation sector and with a consumption of bio Fischer-Tropsch diesel (bio-FTD) of **81 PJ** annually in 2050, that corresponds to **37%** of the total. The cost-effective technology selected by the model was the **gasification of biomass**, followed by the **gasification of black liquors** and the **gasification of MSW**. This results allow to foresee an important role of the advanced biofuels in the transportation sector, mainly if we consider a low carbon economy for Portugal

Keywords: Advanced biofuels, new production technologies, GHG emission, biorefinery and future scenarios.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1.	Introdução	1
2.	Bioenergia para produção de biocombustíveis avançados.....	9
2.1.	Estado actual das tecnologias de produção avançadas	12
2.2.	Matérias-primas	15
2.3.	Biocombustíveis avançados	16
2.4.	Misturas de biocombustíveis	21
2.5.	Enquadramento legal	22
2.5.1.	Políticas da União Europeia.....	22
2.5.2.	Políticas nacionais	25
2.6.	Importância ambiental e sustentabilidade	27
3.	Tecnologias de produção de biocombustíveis avançados	33
3.1.	Processos de transformação base.....	33
3.1.1.	Gasificação	33
3.1.2.	Síntese Fischer-Tropsch.....	39
3.1.3.	Pirólise	41
3.1.4.	Outros processos.....	42
3.2.	Licores Negros	44
3.2.1.	Produção de DME/Metanol	45
3.2.2.	Produção de metano	47
3.2.3.	Produção de Metanol.....	48
3.2.4.	Produção de hidrogénio	49
3.2.5.	Produção de Fischer-Tropsch diesel.....	51
3.3.	Biomassa	52
3.3.1.	Produção de DME.....	52
3.3.2.	Produção de metanol	53
3.3.3.	Produção de hidrogénio	55
3.3.4.	Produção de Fischer-Tropsch diesel.....	56
3.3.5.	Produção de bioetanol	56
3.3.6.	Produção de Bio-SNG	58
3.4.	Resíduos sólidos urbanos	59
3.4.1.	Produção de Fischer-Tropsch Diesel e Bio-SNG	59

3.4.2.	Produção de bioetanol	60
3.5.	Algas	60
3.5.1.	Produção de biocombustível directamente da alga.....	62
3.5.2.	Produção de biocombustíveis a partir da alga inteira.....	65
3.6.	Implementação futura de biocombustíveis avançados	68
4.	Potencial de implementação dos biocombustíveis.....	71
4.1.	Contexto actual	72
4.1.1.	Biocombustíveis Convencionais na Europa.....	72
4.1.2.	Biocombustíveis Avançados na Europa.....	74
4.1.3.	Biocombustíveis Convencionais/1ª geração em Portugal.....	76
4.1.4.	Biocombustíveis Avançados em Portugal	77
4.2.	Potencial de disponibilidade de matéria-prima para produção de biocombustíveis .	77
4.2.1.	Potencial global de biomassa disponível para produção de biocombustíveis avançados em 2050.....	78
4.2.2.	Potencial de disponibilidade de licores negros.....	79
4.2.3.	Potencial de disponibilidade da biomassa geral	80
4.3.	Potencial dos biocombustíveis para a redução de emissões de GEE.....	84
4.4.	Potencial para Portugal	86
4.5.	Barreiras à implementação dos biocombustíveis	96
5.	Conclusões.....	99
6.	Bibliografia	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Consumo mundial de combustíveis fósseis de 1950 a 2003 em Mtep	1
Figura 1.2 – Emissão de GEE por sector em 2007 na UE-27.	2
Figura 1.3 - Emissão de GEE no sector dos transportes, por meio de transporte em 2007 na UE 27.....	2
Figura 1.4 - Produção mundial de biocombustíveis do ano 2000 a 2010 em mil milhões de litros.	4
Figura 2.1 - Vias de produção de biocombustíveis.....	11
Figura 2.2 -Esquema dos processos de produção bioquímico e termoquímico.	12
Figura 2.3 - Estado de maturidade dos diferentes biocombustíveis.....	13
Figura 2.4 - Cadeia de fornecimento de biocombustíveis.....	14
Figura 2.5 - Princípios básicos das refinarias de petróleo tradicionais vs biorefinarias.....	15
Figura 2.6 - Tipos de biomassa geral para biocombustíveis avançados a) Gramíneas (<i>switchgrass</i>) b) eulália c)Resíduos de madeira (aparas) d) Cultura de salgueiro e) Palha de trigo f) Culturas de Choupo.	15
Figura 2.7 - Licor Negro	16
Figura 2.8 - Tipos de Misturas de etanol e respectivos veículos.....	22
Figura 2.9 - Metas obrigatórias de biocombustíveis na UE -27 em 2010.	25
Figura 2.10 - Emissões de GEE em todo o ciclo de vida (CO ₂ eq por km) dos combustíveis fósseis vs biocombustíveis convencionais e biocombustíveis avançados.	28
Figura 2.11 - Impacte da produção de biocombustíveis de 1ª e 2ª geração	28
Figura 2.12 - Esquema com as questões relacionadas com a sustentabilidade dos biocombustíveis.	31
Figura 3.1 - Reacção geral da gasificação.....	33
Figura 3.2 - Biocombustíveis produzidos a partir do gás de síntese obtido na gasificação.	35
Figura 3.3 - Esquema de um gasificador de leito em suspensão.	36
Figura 3.4 - Esquema típico de um gasificador de leito fluidizado.....	37
Figura 3.5 - Esquema típico dos gasificadores de fluxo em contra-corrente (a) e de fluxo em paralelo (b).	38
Figura 3.6 - Esquemas típicos dos reactores de Fischer-Tropsch.....	41
Figura 3.7 - Reacção geral de pirólise.....	41
Figura 3.8 - Esquema de um reactor de pirólise.	42

Figura 3.9 - Produção de pasta de papel convencional e esquema com a produção de gás de síntese.	44
Figura 3.10 - Esquema típico da produção de biocombustíveis a partir dos licores negros.....	46
Figura 3.11 - Exemplo de um fotobioreactor para produção de algas (esquerda) e produção de algas em tanques abertos no Hawaii (direita).	62
Figura 3.12 - Esquema das vias potenciais de conversão da alga inteira em biocombustíveis. .	67
Figura 3.13 - Capacidade de produção de biocombustíveis avançados para 2015, 2020 e 2030 do roadmap da IEA.....	69
Figura 3.15 - Percentagem de biocombustíveis no sector dos transportes em 2030, 2035 e 2050 de acordo com vários cenários efectuados.....	69
Figura 4.1 - Produção global de etanol e biodiesel de 2000 a 2011.	72
Figura 4.2 - Consumo final de biocombustíveis em % de energia final no sector dos transportes na UE-27.	73
Figura 4.3 - Capacidade de produção de biocombustíveis avançados na Europa até 2008 e a capacidade de produção adicional planeada para 2009.....	74
Figura 4.4- Principais produtores de biodiesel em Portugal em 2010.	76
Figura 4.5 - Custos de produção das matérias-primas de 1ª geração e de geração avançada na Europa em 2030.	80
Figura 4.6 - Área potencialmente disponível para produção de culturas dedicadamente energéticas na Europa em 2030.....	81
Figura 4.7 - Distribuição espacial dos custos de produção de culturas de madeira dedicadamente energéticas na Europa em 2005 (€2005/GJ).....	82
Figura 4.8 - Potencial de disponibilidade de biomassa (culturas energéticas e de resíduos agrícolas) na Europa em 2020 (GJ/(ha*ano).	83
Figura 4.9 - Uso de energia global no sector dos transportes (a) e uso dos biocombustíveis nos diferentes meios de transporte (b) em 2050 (cenário BLUEMap da IEA).....	85
Figura 4.10 - Contribuição dos biocombustíveis para a redução das emissões de GEE do sector dos transportes de 2010 a 2050.....	85
Figura 4.11 - Parque de veículos motorizados por tipo de combustível utilizado em Portugal em 2011.....	86
Figura 4.12 - Consumo de energia final por sector para o cenário biof_GEE em Portugal de 2010 a 2050 (PJ).	87

Figura 4.13 - Consumo de recursos endógenos no cenário biof_GEE em Portugal de 2010 a 2050 (PJ).....	88
Figura 4.14 - Importação de petróleo bruto em PJ no cenário biof_GEE para Portugal em 2050.	88
Figura 4.15 - Consumo de FT-diesel (esquerda) e de biodiesel (direita) de 2010 a 2050 em cada um dos cenários (PJ).....	90
Figura 4.16 - Consumo de energia final nos transportes em PJ de 2010 a 2050 para o cenário base_GEE.....	91
Figura 4.17 - Consumo de energia final nos transportes em PJ de 2010 a 2050 para o cenário biof_GEE.....	91
Figura 4.18 - Distribuição relativa dos passageiros transportados por tipo de combustível de 2010 a 2050 em Portugal- Cenário base_GEE (esquerda) e cenário biof_GEE (direita).	92
Figura 4.19 - Distribuição relativa das toneladas de mercadorias transportadas por tipo de combustível de 2010 a 2050 em Portugal- Cenário base_GEE (esquerda) e cenário biof_GEE (direita).	93
Figura 4.20 - Emissões de GEE por sector - cenário biof_GEE (Gg CO ₂ eq).....	94
Figura 4.21 - Emissões de GEE no Sector dos Transportes nos 2 Cenários.....	95
Figura 4.22 - Matriz de avaliação da adequação dos biocombustíveis.....	96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Sistema de recompensação pelo uso de matérias-primas endógenas não-alimentares, lenho-celulósicas e de resíduos para produção de biocombustíveis.....	27
Tabela 2.2 - Redução da emissão de GEE resultante do consumo de biocombustíveis na UE em 2008, comparativamente aos combustíveis fósseis.	29
Tabela 2.3 - Postos de trabalho estimados (x100) relacionados com a indústria da bioenergia em 2011.....	29
Tabela 3.1 -Composição do gás de síntese (em %) de acordo com os diferentes agentes de gasificação.	34
Tabela 3.2 - Características tecno-económicas da gasificação térmica de licor negros para produção de DME (processo Chemrec).	47
Tabela 3.3 – Características tecno-económicas da gasificação catalítica hidrotérmica do licor negro para produção de CH ₄ (processo da Chemrec).....	48
Tabela 3.4 – Características tecno-económicas da gasificação de licores negros para produção de metanol.	49
Tabela 3.5 - Características tecno-económicas da gasificação seca de licores negros para produção de hidrogénio (Processo Chemrec).....	50
Tabela 3.6 - Características tecno-económicas da gasificação de licores negros para a produção de FT-diesel (Processo Chemrec).	51
Tabela 3.7 - Características tecno-económicas da gasificação de biomassa para a produção de DME.....	52
Tabela 3.8 - Características tecno-económicas da produção de metanol a partir da gasificação da biomassa (Processo Chemrec).	53
Tabela 3.9 - Características tecno-económicas da gasificação de biomassa a energia solar para produção de metanol.....	54
Tabela 3.10 – Características tecno-económicas da gasificação da biomassa para produção de metanol com captura de CO ₂	54
Tabela 3.11 - Características tecno-económicas da produção de hidrogénio a partir da gasificação da biomassa (Processo do NREL).....	55
Tabela 3.12 - Características tecno-económicas da produção de FT-diesel a partir da gasificação de biomassa e síntese FT (Processo Choren).	56

Tabela 3.13 - Características tecno-económicas da produção de etanol a partir de biomassa com SSF.	57
Tabela 3.14 - Características tecno-económicas da produção de etanol através de processos bioquímicos (modelado pelo NREL).	57
Tabela 3.15 - Características tecno-económicas da produção de etanol a partir da gasificação da biomassa (modelado pelo NREL).	58
Tabela 3.16 - Características tecno-económicas da produção de bio-SNG através da gasificação da biomassa.	59
Tabela 3.17 - Características tecno-económicas da produção de FTD e bio-SNG a partir de resíduos sólidos urbanos.	59
Tabela 3.18 - Características tecno-económicas da produção de bioetanol através de resíduos sólidos urbanos.	60
Tabela 3.19 - Comparação de diferentes rendimentos de óleos por tipo de cultura utilizada. (Fonte: adaptado de [61])	61
Tabela 4.4 - Potencial global de biomassa disponível em 2050 das diferentes categorias.	78
Tabela 4.2 - Potencial teórico máximo de biomassa em 2020, 2030 e 2050 em Portugal.	83
Tabela 4.3 - Potencial teórico máximo de RSU em 2020, 2030 e 2050 em Portugal.	84
Tabela 4.5- Tecnologias seleccionadas pelo TIMES_PT na criação do cenário “biof_GEE” de 2015 a 2050 e respectiva produção de biocombustível e consumo.	89

LISTA DE ACRÓNIMOS E SIGLAS

1ªG – Primeira geração

CE – Comissão Europeia

CH₄ – Metano

CO₂ – Dióxido de Carbono

EJ – Exajoule - 10¹⁸ joule

EtOH – Etanol

EUA – Estados Unidos da América

FT – Fischer-Tropsch

FTD – Fischer-Tropsch diesel

GEE – Gases efeito de estufa

GJ – Gigajoule – 10⁹ joule

GNC – Gás natural comprimido

GPL – Gás petrolífero liquefeito

Gg – Gigagrama – 10⁹ grama

Gt – Gigatonelada – 10⁹ tonelada

H₂ – Hidrogénio

IEA - *International Energy Agency*

INE – Instituto nacional de estatística

IPCC – *Intergovernmental Panel for Climate Change*

Lux – Unidade de iluminamento

MeOH - Metanol

Mtep – Milhões de toneladas equivalentes de petróleo

NREL - *National Renewable Energy Laboratory*

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

PJ – Petajoule – 10¹⁵ joule

RSU – Resíduos sólidos urbanos

SNG – *Synthetic natural gas* – gás natural sintético

t - tonelada

UE – União Europeia

USD – *United States Dollars* – dólares americanos

1. Introdução

O desenvolvimento tecnológico e energético tem sido um factor decisivo para o desenvolvimento global no último século e foi sustentado por um fornecimento energético largamente baseado em combustíveis fósseis [1]. Cerca de 85% da energia global vem dos combustíveis fósseis e estima-se que o seu consumo irá aumentar em 50% de 2005 a 2030, causando a diminuição e desaparecimento dos recursos de combustíveis fósseis conhecidos (2007) [1]. A elevada dependência do petróleo e o aumento rápido no consumo de energia suscita questões como o aquecimento global e as alterações climáticas, segurança de fornecimento de combustíveis e a depleção de fontes/recursos não renováveis [2].

O sector dos transportes desempenha um papel crucial nestes problemas devido á sua elevada dependência com os combustíveis fósseis e ao aumento previsto da procura de mobilidade, especialmente nos países em desenvolvimento [1]. Se esta tendência se mantiver, tecnologias alternativas, quer automóveis, quer de combustíveis, ou ambas, serão necessárias para satisfazer esta procura de forma sustentável e têm de satisfazer requisitos, como estarem acessíveis para todos, ser de utilização “limpa” e de custos acessíveis [1]. No gráfico da Figura 1.1 é apresentado o consumo mundial de combustíveis fósseis de 1950 a 2003, em milhões de Mtep, mostrando a sua tendência crescente.

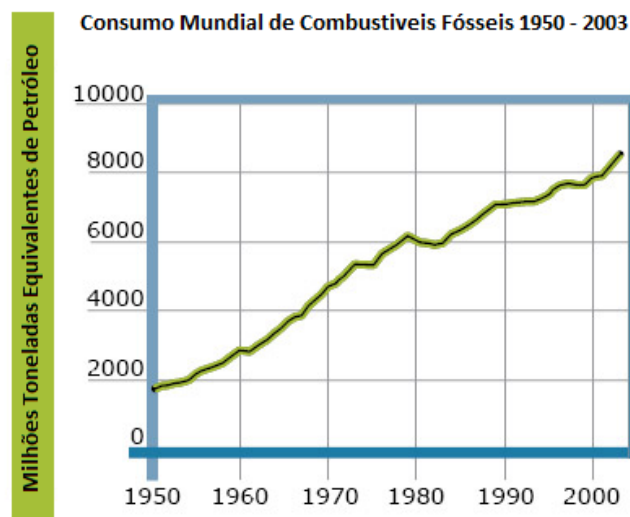


Figura 1.1 - Consumo mundial de combustíveis fósseis de 1950 a 2003 em Mtep (Fonte: adaptado de [3])

As concentrações crescentes de GEE na atmosfera já causaram mudanças perceptíveis no clima e conduzirão a crescentes alterações climáticas no futuro [1]. O sector dos transportes contribui significativamente para as emissões dos GEE, representado 23% globalmente e 30% na OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico) das emissões de CO₂ pela combustão de combustíveis em 2005 [1] e é dependente dos combustíveis fósseis em 98% [4]. O transporte rodoviário é o principal emissor de CO₂, mas outros meios de transportes, como a aviação, também têm impacte no aquecimento global e nas alterações climáticas [5]. Em 2007 o sector dos transportes contribuiu com a emissão de cerca de 983 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, correspondente a 19,5 % do total das emissões e o transporte rodoviário contribui com 70,9 % destas emissões [6]. Nos gráficos das figura 1.2 e figura 1.3 estão representadas, respectivamente, as emissões de GEE por sector em 2007 na UE 27 e as emissões de GEE no sector dos transportes por meio de transporte em 2007 na UE 27.

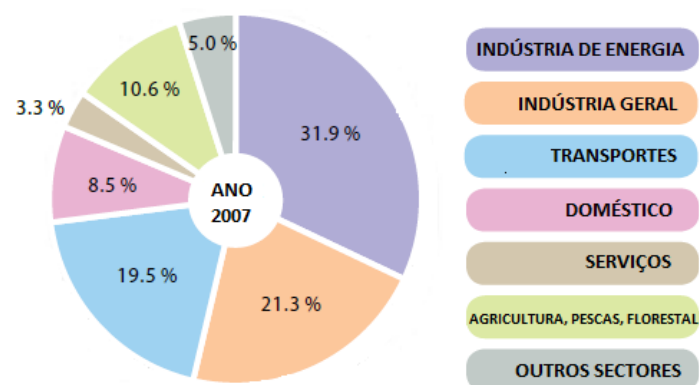


Figura 1.2 – Emissão de GEE por sector em 2007 na UE-27. (Fonte: Adaptado de [6])

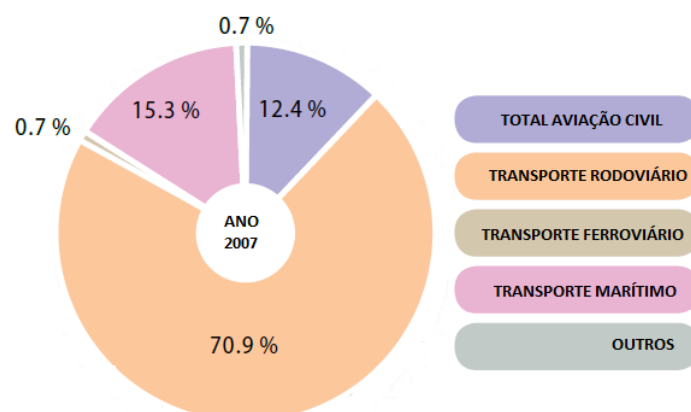


Figura 1.3 - Emissão de GEE no sector dos transportes, por meio de transporte em 2007 na UE 27. (Fonte: adaptado de [6])

Um dos factores chave para o desenvolvimento tecnológico sustentável é a transição do uso dos combustíveis fósseis para fontes renováveis, como as matérias-primas derivadas de biomassa [5]. Os biocombustíveis, como o biodiesel e o bioetanol, têm vindo a ser assumidos como uma alternativa de combustíveis não-fósseis e de baixo carbono, de maneira a que haja uma redução da dependência do petróleo, e contribuem para os esforços crescentes na descarbonização do sector dos transportes, muitas vezes com alterações mínimas ao nível dos veículos e das infra-estruturas existentes [7]. Assim, o desenvolvimento e avaliação das opções tecnológicas e dos vários cenários de exploração dos biocombustíveis são necessários, pois são potencialmente custo-efectivos, de utilização limpa e acessíveis a todos.

O uso global dos biocombustíveis aumentou rapidamente nos últimos 10 anos, produzindo-se em 2008 cerca de 90 mil milhões de litros por ano, seis vezes mais que no início da década e equivalente a 3,5% dos combustíveis fósseis utilizados nos transportes (em volume) [8]. Na UE os biocombustíveis estão a ser desenvolvidos principalmente para responder aos problemas ambientais e reduzir a dependência do petróleo [8].

A mitigação das alterações climáticas e a segurança energética são as principais forças motrizes para o aumento da utilização da energia da biomassa, a bioenergia. Uma grande variedade de iniciativas para a redução da dependência do petróleo e das emissões de gases efeito de estufa (GEE) associadas ao petróleo estão em estado de desenvolvimento. Actualmente a colocação de esforços que favoreçam o uso de fontes de energia renováveis, incluindo a produção de biocombustíveis em larga escala, oferece um grande potencial para solucionar os problemas ambientais. É provável que os combustíveis renováveis, onde se incluem os biocombustíveis, desempenhem um papel fundamental no futuro do fornecimento energético em substituição aos combustíveis fósseis, devido às regulamentações rigorosas de redução das emissões dos GEE [2]. No gráfico da Figura 1.4 está representada a produção mundial de biocombustíveis de 200 a 2010 onde se observa esta tendência crescente de produção.

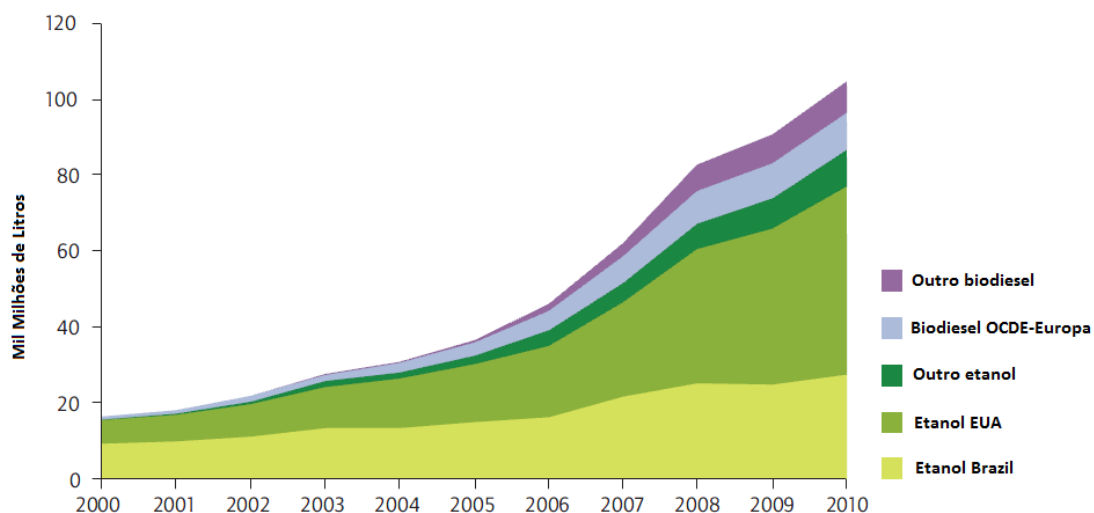


Figura 1.4 - Produção mundial de biocombustíveis do ano 2000 a 2010 em mil milhões de litros. (Fonte: adaptado de [7])

Existem muitos obstáculos a serem ultrapassados para uma aceitação global destas matérias-primas, entre eles, o desenvolvimento de tecnologias apropriadas para a produção de biocombustíveis avançados, a disponibilidade das matérias-primas para a sua produção e a concepção errada de estratégias para a sua implementação [5]. Conseguir compreender o potencial destas opções tecnológicas é uma tarefa complexa, pois existe um elevado nível de incerteza em relação ao potencial real das diferentes opções tecnológicas [1].

Existe uma incerteza considerável em como classificar os biocombustíveis. Tipicamente os biocombustíveis são divididos em primeira, segunda e terceira geração, mas o mesmo biocombustível pode ser classificado diferentemente dependendo do tipo de matéria-prima utilizada ou da maturidade da tecnologia utilizada. No âmbito desta dissertação para a classificação dos biocombustíveis utiliza-se a maturidade da tecnologia e o tipo de matéria-prima utilizado e referem-se como biocombustíveis **convencionais**, os de 1ª geração, e como biocombustíveis **avançados** os de 2ª, 3ª ou superiores gerações.

Muitas das tecnologias que irão contribuir para a comercialização dos biocombustíveis avançados no futuro ainda não estão completamente desenvolvidas e implementadas. Para que se atinja um desenvolvimento sustentável e competitivo destes biocombustíveis avançados é necessária a criação de políticas de apoio e incentivo, e o uso de estratégias sustentáveis, efectivas e flexíveis [7]. Uma das medidas de apoio ao desenvolvimento dos

biocombustíveis é a imposição de percentagens de misturas destes com os combustíveis fósseis, combinada com incentivos fiscais [7]. As metas definidas pela UE para o desenvolvimento dos biocombustíveis têm como objectivo aumentar a segurança de fornecimento energético, melhorar as emissões de carbono e sustentar a competitividade europeia [4]. O desenvolvimento de tecnologias de biocombustíveis inovadoras permitirá alcançar estes objectivos.

As projecções para os biocombustíveis avançados começarem a ser comercializados em larga escala variam bastante, mas a maioria aponta para depois de 2015 [9]. Os biocombustíveis avançados têm o potencial de serem muito superiores em relação aos de primeira geração, nomeadamente ao nível de balanços e eficiências energéticas, redução dos GEE, necessidades de uso do solo e competição com alimento, com água e outras indústrias. Estes ainda não foram implementados comercialmente, pois as tecnologias de conversão ainda não foram demonstradas em larga escala comercial, é necessária mais investigação em relação a requisitos de uso do solo, de uso de água e de energia [9].

Os biocombustíveis são considerados como uma solução a curto-médio prazo para alternativas aos combustíveis fósseis no sector dos transportes, principalmente para os transportes pesados e aviação onde poucas alternativas aos combustíveis líquidos existem. Além disso, os biocombustíveis oferecem oportunidades para o desenvolvimento económico, diversificação do sector agrícola, integração da gestão de florestas e remoção dos aterros para resíduos urbanos [10]. Estas oportunidades estão acompanhadas de obstáculos significativos, o estado actual da tecnologia de biocombustíveis de baixo custo não oferece grandes benefícios ambientais, e os biocombustíveis que serão capazes de oferecer essas vantagens ainda não estão comercialmente disponíveis [10].

A produção dos biocombustíveis oferece novas opções para a utilização de culturas agrícolas e energéticas, de resíduos agro-florestais e dos fluxos de resíduos, mas aspectos ambientais, sociais e económicos têm de ser considerados. A diversidade em matérias-primas disponíveis e o grande número de formas/processos de produção tornam o cálculo de desempenho de emissões de GEE e do desempenho em relação aos combustíveis fósseis bastante complexo. [11]

O desenvolvimento de fontes de energia alternativas é visto como uma forma de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis tanto por razões ambientais como económicas. Sendo os biocombustíveis avançados uma destas alternativas, uma análise das tecnologias de produção é fundamental para se saber o potencial futuro desta alternativa.

Esta dissertação faz a sistematização e comparação de algumas das tecnologias de produção de biocombustíveis avançados. A comparação e análise das diferentes tecnologias são feitas com recurso ao modelo tecnológico de optimização linear TIMES_PT que cria cenários futuros, utilizando os valores tecno-económicos de cada tecnologia e diferentes condições/restrições (a nível económico ou ambiental).

No âmbito desta dissertação considera-se:

- i) Os vários tipos de biocombustíveis avançados, ou seja, os novos biocombustíveis emergentes;
- ii) As novas tecnologias de produção, que se baseiam basicamente em processos bioquímicos ou processos termoquímicos;
- iii) Um enfoque da análise no potencial destas tecnologias para o sistema energético português;
- iv) Um enfoque na análise dos resultados obtidos no modelo TIMES_PT para o sector dos transportes em Portugal.

O estudo realizado tem como objectivo principal analisar o potencial dos biocombustíveis avançados para o sistema energético português e para tal considerou-se os seguintes objectivos secundários:

- a) Sistematizar o estado actual dos biocombustíveis avançados;
- b) Delinear o estado de maturidade das tecnologias de produção avançadas;
- c) Fazer uma análise tecno-económica de algumas das tecnologias de produção avançada consoante o tipo de matéria-prima utilizada;

- d) Analisar o potencial de disponibilidade das matérias-primas para produção de biocombustíveis avançados;
- e) Análise exploratória sobre o potencial para Portugal, com base em cenários gerados pelo modelo TIMES_PT, no sector dos transportes.

Este trabalho tem o contributo de apresentar e analisar cenários futuros para o sistema energético português em que se consideram a implementação de tecnologias de produção de biocombustíveis avançados em Portugal e analisar a possível viabilidade de produção de biocombustíveis avançados em Portugal, reúne um leque significativo das tecnologias de produção de biocombustíveis avançados, tendo em conta as suas características tecnológicas, faz levantamento de estudos que avaliam o potencial de disponibilidade de matérias-primas para produção de biocombustíveis a nível global, a nível da Europa e a nível de Portugal e analisa de uma forma transversal a temática dos biocombustíveis avançados para o sector dos transportes.

Esta dissertação tem seis capítulos principais: i) no primeiro capítulo, **Introdução**, é apresentado o tema e definido o âmbito, a motivação, a contribuição e a estrutura da dissertação, ii) no segundo capítulo, **Bioenergia para produção de biocombustíveis avançados**, é feita a definição de bioenergia e biocombustíveis, um levantamento das tecnologias de produção avançadas, das matérias-primas e dos biocombustíveis avançados que foram analisados, o enquadramento legal e é definida a importância ambiental e sustentabilidade dos biocombustíveis avançados, iii) no terceiro capítulo, **Tecnologias de produção de biocombustíveis avançados**, é feita uma descrição técnica das tecnologias de produção de biocombustíveis avançados analisadas, iv) no quarto capítulo, **Potencial de utilização dos biocombustíveis avançados**, são definidos o contexto actual (da última década) dos biocombustíveis ao nível Europeu e ao nível de Portugal, o potencial de substituição dos biocombustíveis avançados em relação aos combustíveis fósseis, em termos da disponibilidade de matéria-prima, da maturidade das tecnologias, da redução das emissões de GEE e das previsões até 2050 e o potencial para Portugal, através da análise exploratória dos resultados obtidos através do modelo TIMES_PT. São também definidas as limitações para esta promoção e implementação de biocombustíveis avançados, v) no quinto capítulo, **Conclusões**, são feitas as considerações finais e são referidos aspectos relativos a trabalhos futuros.

2. Bioenergia para produção de biocombustíveis avançados

A biomassa é material orgânico que contém **bioenergia**, esta forma de energia está presente em organismos vivos ou recentemente vivos e pode ser processada na produção de vários produtos, como o biocombustível. As plantas recebem a bioenergia através da fotossíntese e quase todos os tipos de bioenergia estão associados à luz solar, pelo que a bioenergia tem a grande vantagem de ser considerada renovável. Esta definição de bioenergia exclui especificamente os combustíveis fósseis [12].

Biocombustíveis são um conjunto de combustíveis derivados de vários tipos de biomassa e podem ser produzidos através de várias tecnologias de conversão [13]. Estes combustíveis podem ser álcoois (como o etanol, metanol ou butanol), hidrocarbonetos (semelhantes a gasolina, diesel, e combustível de aviação), hidrogénio (H_2), gás natural sintético (SNG - *synthetic natural gas*) e outros ainda tipos de biocombustível [10].

Os biocombustíveis de **1ª geração**, que já estão estabelecidos em larga escala comercial, utilizam culturas alimentares como matéria-prima, como o milho e a cana-de-açúcar. Estas culturas de açúcares, de amido e de óleos, são relativamente fáceis de converter em, por exemplo, etanol ou biodiesel, mas representam uma pequena parte da biomassa das plantas, limitando os rendimentos de produção por unidade de área. A utilização de matérias-primas que não são utilizadas na indústria alimentar, como a madeira, culturas dedicadamente energéticas, resíduos florestais, resíduos agrícolas, resíduos domésticos, resíduos industriais, algas e outros tipos de matéria-prima lenho-celulósica evita impactos directos com a indústria alimentar e a competição com o alimento [10].

Os **biocombustíveis avançados** são baseados nos recursos de biomassa celulósica e uso do solo que não são utilizados para outras necessidades primárias (produção alimentar e têxtil), como os resíduos lenho-celulósicos de agricultura e florestais, as culturas de rotação rápida e as culturas não-alimentares (de crescimento em área não cultivável ou culturas não alimentícias), a fracção orgânica de resíduos urbanos e a biomassa à base de algas; em suma, biomassa celulósica, lenho-celulósica e algas [14]. A biomassa celulósica é constituída por três componentes principais: a celulose, a hemicelulose e a lenhina. Celulose e a hemicelulose são polímeros de hidratos de carbono que podem ser decompostos em açúcares para

fermentação. A lenhina é inerte na conversão biológica, pelo que pode ser utilizada nos processos de conversão termoquímicos [10]. As tecnologias de produção de biocombustíveis avançados têm a vantagem de aproveitar uma maior parte da biomassa das matérias-primas (uma maior parte das plantas e do material celulósico), como madeira, gramíneas, palhas da indústria agrícola e a fracção orgânica de resíduos domésticos [13].

Os biocombustíveis avançados estão actualmente em pesquisa e desenvolvimento, tais como, o biohidrogénio, o biometanol, o bio-DME, o Fischer-Tropsch diesel, o bioetanol, o biobutanol, biogasolina, (gasolina renovável), diesel renovável, mistura de álcoois e bio-SNG. As algas podem produzir vários biocombustíveis ou bio óleo e são uma matéria-prima com necessidades reduzidas de inputs energéticos e com altos rendimentos de produtividade na produção de biocombustíveis. Os biocombustíveis sintéticos produzidos a partir da biomassa, por exemplo, através do processo Fischer-Tropsch ou outras reacções catalíticas também se incluem na categoria de biocombustível avançado [13]; [15]. No esquema da Figura 2.1 são representadas as vias de produção de biocombustíveis avançados analisados nesta dissertação.

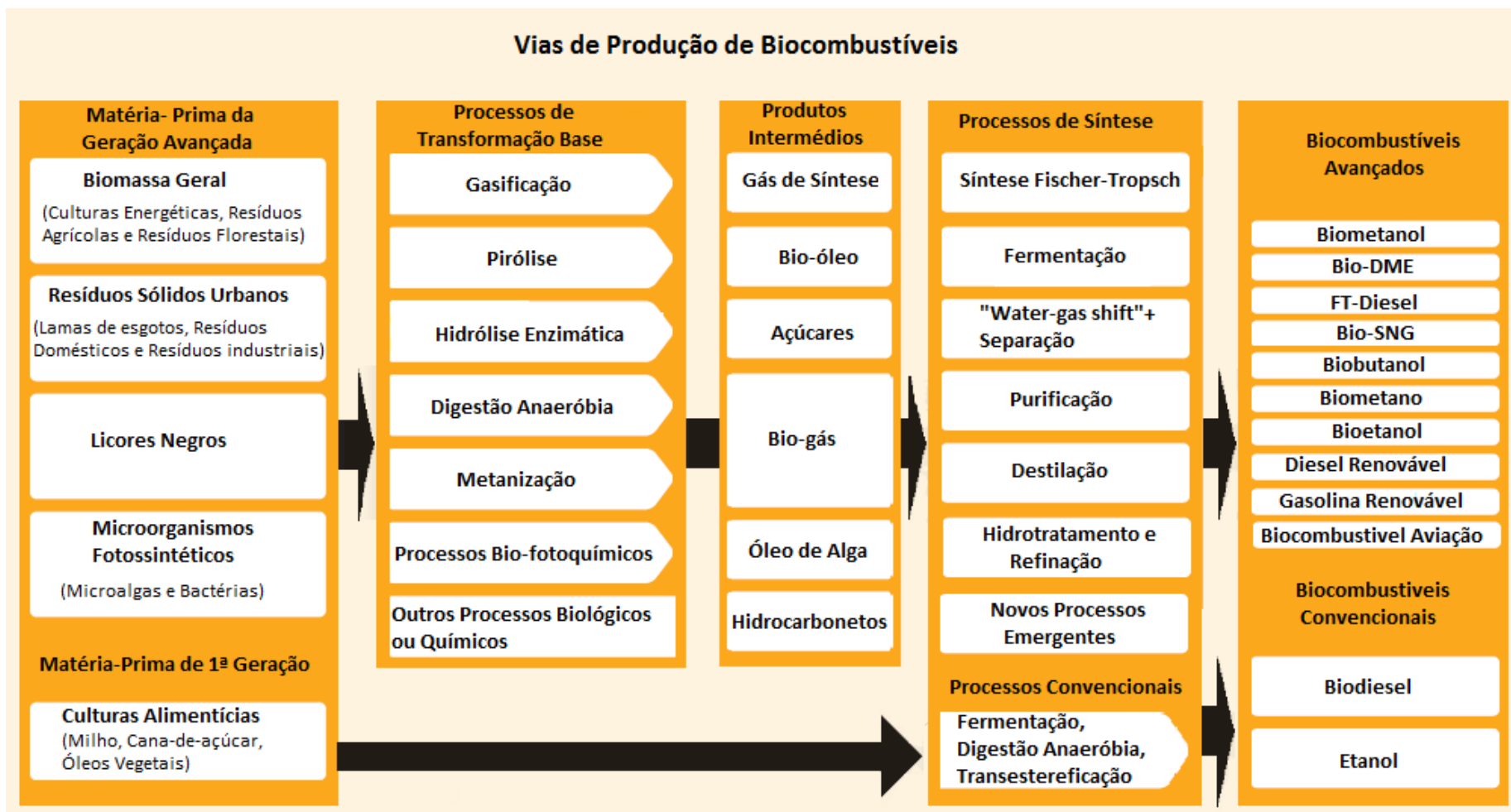


Figura 2.1 - Vias de produção de biocombustíveis. (Fonte: adaptado de [10]; [16])

2.1. Estado actual das tecnologias de produção avançadas

Actualmente existe uma grande variedade de tecnologias de conversão de biocombustíveis avançados, estando em vários estados de desenvolvimento e maturidade. As tecnologias de conversão de biocombustíveis emergentes, referem-se como as tecnologias de produção avançadas. Estas tecnologias são tipicamente classificadas em três categorias de acordo com os processos que utilizam. Processos termoquímicos, processos que utilizam calor, pressão e catalisadores para produzir biocombustíveis, os processos bioquímicos, que utilizam organismos e enzimas na decomposição da biomassa em açúcares e a sua fermentação nos produtos desejados, ou uma combinação dos dois processos. Nos esquemas da Figura 2.2 estão representadas as etapas gerais típicas dos processos bioquímico e termoquímico.

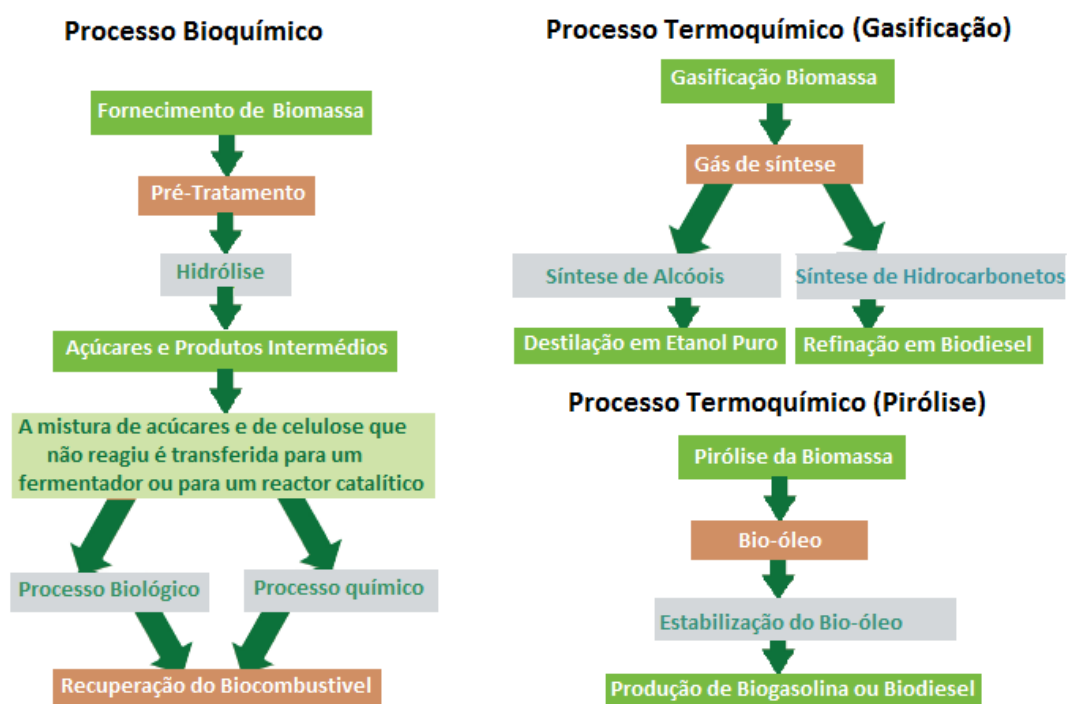


Figura 2.2 -Esquema dos processos de produção bioquímico e termoquímico. (Fonte: adaptado de [17]; [18])

Os processos bioquímicos utilizam a hidrólise e fermentação, a digestão anaeróbia e novas abordagens emergentes. Os processos termoquímicos utilizam a pirólise, a gasificação e reacções catalíticas na conversão da biomassa em gás de síntese que pode ser convertido nos combustíveis desejados, por exemplo através do processo de Fischer-Tropsch [10].

Os processos de conversão de biomassa celulósica em biocombustíveis estão actualmente em desenvolvimento e encontram-se em fase experimental ou laboratorial, fase piloto, fase de demonstração, fase pré-comercial ou fase comercial em pequena escala. Existem um pequeno número de fábricas em operação comercial (á escala comercial) e um grande número de fábricas em construção ou planeadas em todo o mundo [14]; [7].

A maturidade das tecnologias de conversão é o principal obstáculo para a realização de uma produção significativa de biocombustíveis avançados. O desenvolvimento de tecnologias de conversão práticas e custo-efectivas de biomassa celulósica é o factor chave para a implementação dos biocombustíveis avançados [10]. A disponibilidade comercial dos biocombustíveis avançados prende-se na maturidade das tecnologias de conversão e as perspectivas futuras prendem-se no potencial a longo prazo da disponibilidade da matéria-prima [10]. No esquema da Figura 2.3 é apresentado o estado de maturidade dos vários biocombustíveis.

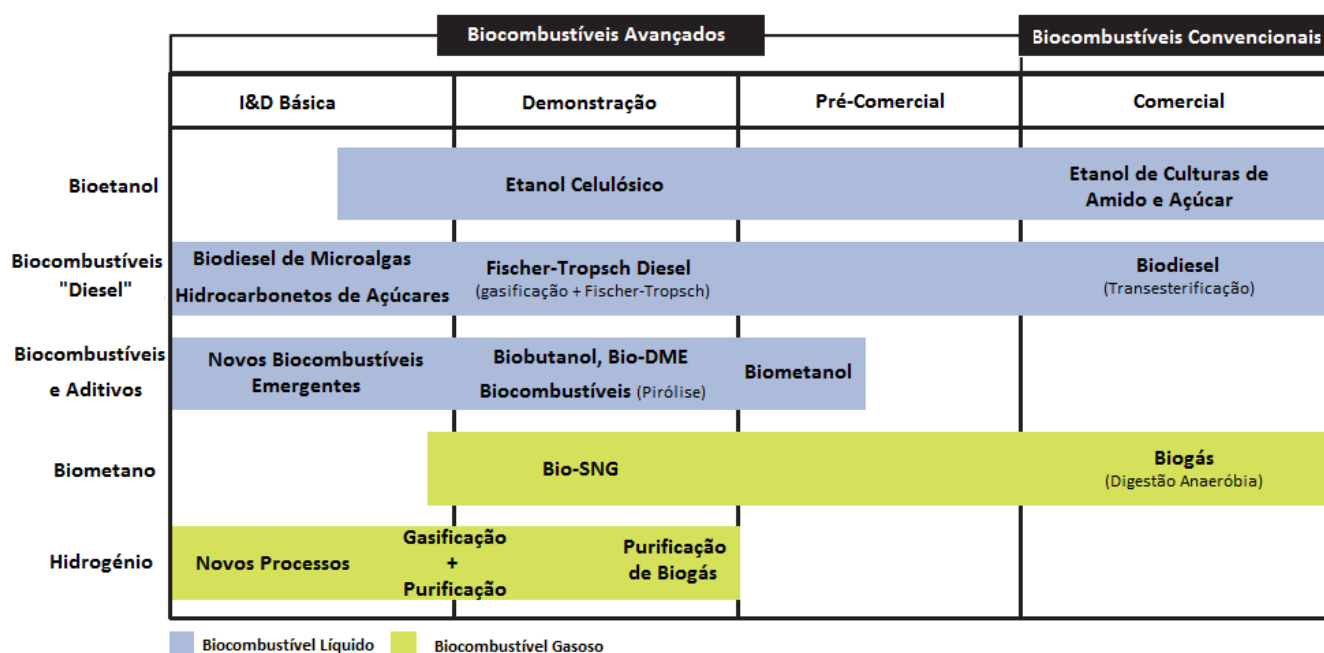


Figura 2.3 - Estado de maturidade dos diferentes biocombustíveis (Fonte: adaptado de [7])

Estão também a ser desenvolvidos processos de intervenção biotecnológica das matérias-primas, de maneira a que a sua estrutura biológica possa ser específica para o produto pretendido, melhorando os rendimentos de conversão em biocombustível. Na cadeia de

fornecimento dos biocombustíveis existem cinco componentes principais: i) produção e/ou recolha de matéria-prima, ii) logísticas de matéria-prima, o transporte, armazenamento e distribuição, iii) conversão da biomassa em biocombustíveis e co-produto, iv) distribuição e armazenamento dos biocombustíveis, v) utilização de biocombustíveis. Esta dissertação é focada na Terceira componente, a conversão da biomassa em biocombustíveis [10] e [19]. No esquema da Figura 2.4 estão representados os componentes principais da cadeia de fornecimento de biocombustíveis.



Figura 2.4 - Cadeia de fornecimento de biocombustíveis. (Fonte: adaptado de [19])

Uma biorefinaria é uma instalação/fábrica que integra processos e equipamentos de conversão de biomassa na produção de biocombustíveis, energia e químicos de valor acrescentado. Este é um conceito semelhante/análogo ao de refinaria de petróleo que produz vários combustíveis e produtos a partir do petróleo [20]. O custo das biorefinarias é o maior investimento de capital único no processo de produção de biocombustíveis, o equipamento de produção da matéria-prima e de distribuição dos biocombustíveis não têm um peso relevante, comparativamente [20]. No esquema da Figura 2.5 estão os princípios básicos da refinaria tradicional e da biorefinaria.

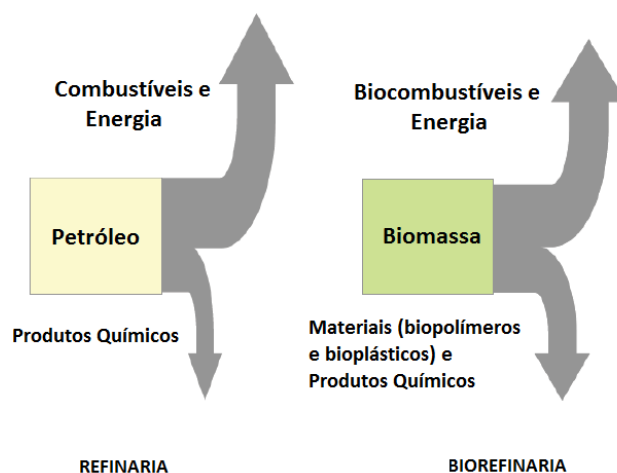


Figura 2.5 - Princípios básicos das refinarias de petróleo tradicionais vs biorefinarias. (Fonte: adaptado de [20])

2.2. Matérias-primas

A produção de biocombustíveis avançados é baseada sobretudo na utilização de matéria-prima celulósica e lenho-celulósica. No âmbito desta tese a matéria-prima referida como biomassa considera-se **biomassa geral**, que inclui culturas dedicadamente energéticas, resíduos florestais e resíduos agrícolas. Na Figura 2.6 estão alguns exemplos de tipos de biomassa para a produção de biocombustíveis avançados.

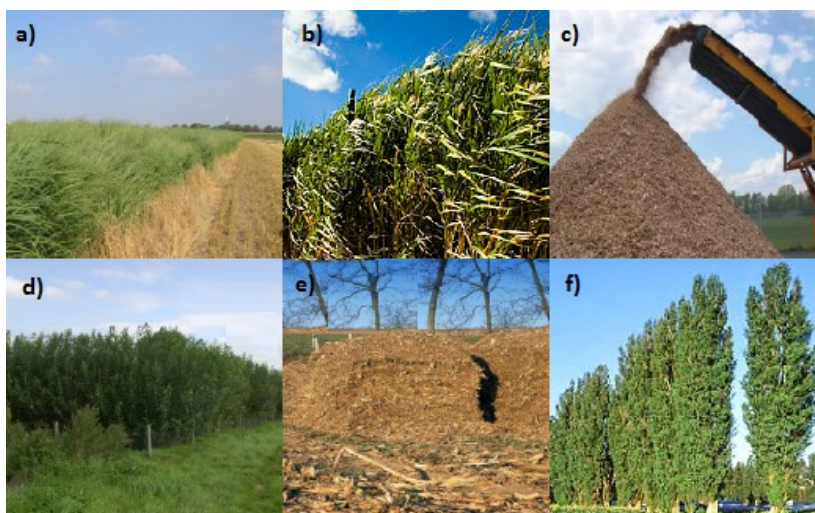


Figura 2.6 - Tipos de biomassa geral para biocombustíveis avançados a) Gramíneas (*switchgrass*) b) eulália c) Resíduos de madeira (aparas) d) Cultura de salgueiro e) Palha de trigo f) Culturas de Choupo. (Fonte: Adaptado de [21])

Para além das matérias-primas consideradas como biomassa geral, referem-se ainda os licores negros, os resíduos sólidos urbanos e as algas, que se apresenta a seguir.

Os **licores negros** são uma solução rica em lenhina produzida no processo de fabrico de papel com biomassa lenho-celulósica, após as fibras de celulose terem sido extraídas para o fabrico de papel. 64 Uma fábrica de pasta de papel produz cerca de 1,7 a 1,8 toneladas de licor negro por tonelada de pasta de papel produzida. (Larson et al., 2000) em [2]. Tem um conteúdo energético de cerca 14 -18 MJ/kg e na



Figura 2.7 - Licor Negro (Fonte: [107])

O uso de **algas** para a produção de biocombustíveis está agora em fase de desenvolvimento. As tecnologias que estão a ser pesquisadas e desenvolvidas utilizam dois processos de produção de biocombustíveis a partir das algas, a produção directa de biocombustível da alga (a alga produz o biocombustíveis, como etano) e o processamento do processamento de toda a alga ou do óleo da alga, o bio-óleo (a alga inteira ou a extracção do óleo da alga). Nestes processos podem ser utilizadas macroalgas, microalgas e bactérias, sendo as microalgas as mais utilizadas.

As microalgas são organismos fotossintéticos unicelulares de rápido crescimento e grande teor energético. Algumas das espécies de algas mais utilizadas para a produção de biocombustíveis são a *Arthrospira Stizenberger*, *Arthrospira platensis*, *anabaena sp.* *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas perigranulata*, *Chlorella Beyerinck*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella emersonii*, *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*, *Nannochloris sp.*, *Nannochloropsis sp.*, *Neochloris oleoabundans*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Tetraselmis sueica* [22]; [23]; [24].

Os **resíduos sólidos urbanos** são principalmente compostos pela fracção orgânica dos resíduos das habitações, mas podem incluir alguns tipos de resíduos comerciais, institucionais e industriais não-perigosos. No dia-a-dia são produzidos resíduos cuja fracção orgânica pode ser aproveitada para a produção de biocombustíveis, que oferece uma opção á tradicional incineração e aterro, dando-lhes um destino sustentável [25].

2.3. Biocombustíveis avançados

Nesta secção são apresentados os tipos de biocombustíveis avançados analisados. Os biocombustíveis líquidos substitutos dos combustíveis fósseis são muitas vezes chamados de

combustíveis BtL (*"Biomass to liquid fuels"*, de biomassa para líquido). Os substitutos da gasolina, incluindo o etanol, representam uma oportunidade significativa para usar tecnologias existentes para expandir o uso de combustíveis alternativos de baixo carbono. Estes substitutos referem-se a qualquer combustível líquido que consegue adequadamente substituir a gasolina nos motores de combustão. Os substitutos do diesel são definidos como os combustíveis diesel derivados de biomassa como o biodiesel e diesel renovável, e também de matérias-primas e recursos específicos como diesel derivado de algas, FT diesel derivado de biomassa e diesel de despolimerização térmica de resíduos industriais e de resíduos de processamento alimentar.

BioDME

O éter dimetílico, DME, de fórmula química CH_3OCH_3 , também é conhecido por metoximetano, éter de madeira, dimetil óxido ou metil éter e é o mais simples dos éteres. É incolor, ligeiramente narcótico, não tóxico, é um gás altamente inflamável em condições ambiente, mas pode ser manuseado como líquido quando pressurizado. As propriedades do DME são semelhantes às do GPL, gás petrolífero liquefeito. [26]

Não existem infra-estruturas para a distribuição e uso do DME, no entanto é possível modificar os motores a diesel convencionais para usarem DME. A pesquisa em usar DME como combustível de transporte em veículos pesados está a ser feita na Suécia [8]. O uso de DME como substituto do diesel tem a vantagem de ter eficiências altas e combustão limpa e livre de fuligens. [26]

Biometano

Biometano, que pode ser considerado bio-SNG ou biogás, de fórmula química CH_4 (este gás pode conter outros constituintes para além do metano), é um biocombustível gasoso produzido através da biomassa por vários processos, como a metanização do gás de síntese obtido a partir da biomassa ou a digestão anaeróbia, e tem propriedades semelhantes ao gás natural [7]; [8]. O biometano pode ser transportado e armazenado em veículos desenhados para utilizarem gás natural, ou otimizado e processado em diferentes hidrocarbonetos líquidos [27].

Existe um interesse crescente no uso do biometano como combustível de transporte, devido aos preços crescentes dos combustíveis derivados do petróleo, ao seu potencial de redução de emissões de gases efeito de estufa e às emissões reduzidas de CO, CO₂, NO_x, e de partículas. O uso do biometano pode alcançar reduções entre 65% e 77% comparando com o diesel e dependendo da tecnologia utilizada [8].

A primeira fábrica de demonstração para a produção de biometano termoquimicamente através da biomassa começou a sua operação em finais de 2008 na Áustria [7]. Os veículos a gás natural podem utilizar biometano produzido a partir da digestão anaeróbia ou gasificação da biomassa. Certos países têm mais de 25% de veículos a gás no seu parque automóvel [7].

Biometanol

O metanol, CH₃OH, é a forma mais simples dos álcoois, é também conhecido por álcool de madeira, álcool metílico, entre outros. É um dos melhores álcoois para biocombustível [28] e pode ser utilizado puro como substituto para os combustíveis derivados do petróleo ou em misturas tais como M85 (85% metanol e 15 de combustível derivado do petróleo) [29]. O metanol apresenta várias vantagens, como, o estatuto de biocombustível avançado ou de 2ª geração, redução de emissões em todo o ciclo de vida (comparando com combustíveis fósseis), energeticamente eficiente, disponibilidade comercial e economicamente competitivo [30].

Bioetanol

Bioetanol, EtOH, de fórmula química C₂H₅OH, conhecido como álcool etílico ou álcool puro, etanol, etanol avançado e etanol celulósico (quando produzido a partir de biomassa celulósica), é um álcool leve, volátil incolor, líquido inflamável com odor característico. EtOH queima de maneira quase invisível e é biodegradável [31]. O bioetanol é produzido de matérias-primas lenho-celulósicas através da conversão bioquímica da celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis. Os açúcares são fermentados em etanol, através dos mesmos processos que os biocombustíveis convencionais. O etanol celulósico tem o potencial de ter melhores desempenhos a nível energético, de emissões de gases efeito de estufa e de necessidades de uso do solo, que os biocombustíveis à base de amido. As primeiras fábricas a escala comercial estão agora a ser implementadas [7].

Hidrogénio

O hidrogénio, também pode ser referido como biohidrogénio, de fórmula química H_2 , pode ser utilizado como combustível em veículos movidos a célula de combustível ou em motores de combustão interna modificados. O hidrogénio pode ser produzido de uma grande variedade de matérias-primas e processos, incluindo a purificação de metano a vapor, separação de água por electrólise e a gasificação da biomassa [8]. Existem mercados alternativos para o biohidrogénio e obstáculos para o seu uso no transporte, incluindo a falta de infra-estruturas de distribuição e abastecimento e veículos capazes de aceitar o combustível. O desenvolvimento do uso de hidrogénio como combustível de transporte tem sido alvo de interesse devido a ter emissões de escape nulas [8].

Biobutanol

O biobutanol ou butanol, de fórmula química $C_4H_{10}O$, também conhecido por álcool butílico tem um comportamento semelhante ao do etanol, é um líquido claro com cheiro sufocante e é pouco solúvel em água. Pode ser utilizado em motores de gasolina e tem a vantagem de ser energeticamente denso e com calor de vaporização próximos aos da gasolina tradicional e com potencial de contaminação de águas reduzido. O butanol é menos corrosivo, menos solúvel em água e menos evaporativo que o etanol, pode ser distribuído nas infra-estruturas existentes e misturado em proporções mais flexíveis com outros combustíveis. [27]

Fischer-Tropsch diesel

O diesel produzido através do processo de Fischer-Tropsch, o Fischer-Tropsch diesel, pode também ser considerado biodiesel avançado, diesel sintético ou diesel renovável, tem propriedades muito semelhantes às do diesel convencional. O Fischer-Tropsch diesel pode ser produzido de um vasto conjunto de matérias-primas, como resíduos agrícolas, resíduos “verdes”, resíduos alimentares ou resíduos florestais. A biomassa é convertida em diesel e nafta através da gasificação e de uma síntese de Fischer-Tropsch.

Este biocombustível pode ser misturado com os combustíveis fósseis em qualquer proporção, pode utilizar as mesmas infra-estruturas. O biodiesel avançado terá uma importância significativa para alcançar as metas propostas no que respeita à implementação de

biocombustíveis, a comercialização deste biocombustível ainda não está presente em grande escala, mas prevê-se a sua completa comercialização num futuro próximo [7].

Bio-óleo de algas

As algas, principalmente as microalgas, têm um elevado conteúdo em óleo, até 60% em peso, e os óleos obtidos a partir destas são utilizados como matéria-prima para a produção de biocombustíveis, como o biodiesel [23]. O óleo produzido de algas pode substituir praticamente todas as fracções do petróleo, excepto as mais pesadas, para além disso, a biomassa algal que sobra após a extracção do óleo pode ser usada para varias aplicações “verdes” [32]. A produção de biocombustíveis a partir das algas não utiliza apenas os óleos extraídos destas, podem utilizar-se processos em que toda a alga é processada para a produção de biocombustíveis ou processos em que é a própria alga a produzir o biocombustível, por exemplo álcoois.

Biogasolina

A biogasolina ou gasolina renovável é um substituto da gasolina que é físico-quimicamente idênticos á gasolina mas são produzidos através de recursos renováveis e tecnologias alternativas. Estes substitutos têm densidades energéticas semelhantes ás da gasolina e podem usar as infra-estruturas existentes [33]. Os alcanos ou parafinas, de fórmula química geral C_nH_{2n+2} , são hidrocarbonetos saturados que fazem parte da constituição dos combustíveis fósseis, mas que podem ser produzidos a partir de outras matérias-primas em vez do petróleo.

Biodiesel

Biodiesel de 1ª geração refere-se a diesel não derivado do petróleo produzido de óleos vegetais ou gorduras animais através de transesterificação. É um processo simples que mistura bio óleos e um catalisador para formar biodiesel, que é frequentemente misturado com o diesel convencional derivado do petróleo.

Diesel derivado de algas está em fase de investigação e desenvolvimento que envolve a produção e crescimento de algas em recipientes ou contentores que reagem com a luz solar e

CO₂ ou alimentação das algas com açúcares para a criação de óleos e posteriormente a sua separação e uso num processo de produção de diesel. Algas são um atractivo recurso de produção de gasolina ou diesel, uma vez que o processo não requiere solo arável e resulta num combustível com reduções de GHG estimadas até 80% comparado com o diesel derivado do petróleo [33]. Adicionalmente, diesel derivado de algas pode ter um potencial significativo na substituição dos combustíveis fósseis devido á habilidade das algas em produzirem até 30 vezes mais óleo por unidade de área de crescimento do que as plantas terrestres [33].

2.4. Misturas de biocombustíveis

As misturas são combinações de combustíveis tradicionais com combustíveis alternativos em diferentes percentagens e podem ser encaradas como combustíveis de transição. As percentagens mais baixas de misturas estão já a ser comercializadas e introduzidas no mercado para funcionarem com a tecnologia tradicional, abrindo caminho para a integração futura dos biocombustíveis.

As misturas de biodiesel podem ser, por exemplo, as B5 e B20, em que o diesel tradicional é misturado com 5% e 20% de biodiesel, respectivamente. Estas misturas podem ser abastecidas nos depósitos de qualquer veículo ligeiro ou pesado a diesel [34]. Como já foi referido, também o metanol é misturado em diferentes percentagens com os combustíveis derivados do petróleo, por exemplo, M85, em que o combustível fóssil é misturado com 85% de metanol. As misturas de etanol são já muito praticadas em todo o mundo e nas mais variadas percentagens. Já foram utilizadas misturas de elevada percentagem, como a E85 e E95, 85% e 95% de etanol, respectivamente, e E100 em autocarros movidos a etanol e misturas de baixa percentagem em veículos a gasolina, a E5, E10 e HE15 (HE, “*hydrous bioethanol*”), misturas de 5%, 10% e 15% de etanol, respectivamente [1]. As misturas de elevada percentagem (E85 e E100) requerem veículos próprios, como os veículos *flex-fuel*, enquanto as misturas em baixa percentagem não o requerem.

Para concluir refira-se que as misturas de baixa percentagem são uma forma rápida de introduzir grandes volumes de biocombustível no sistema de transportes sem modificar as infra-estruturas ou veículos existentes. As misturas de bioetanol existentes no mercado são a E5, E10, HE15, E25 (25% de bioetanol), E-diesel (7,7% de bioetanol), e ED-diesel (10% de

bioetanol e 90% diesel) [1]. Na Figura 2.8 estão os tipos de misturas de etanol e os respectivos veículos.

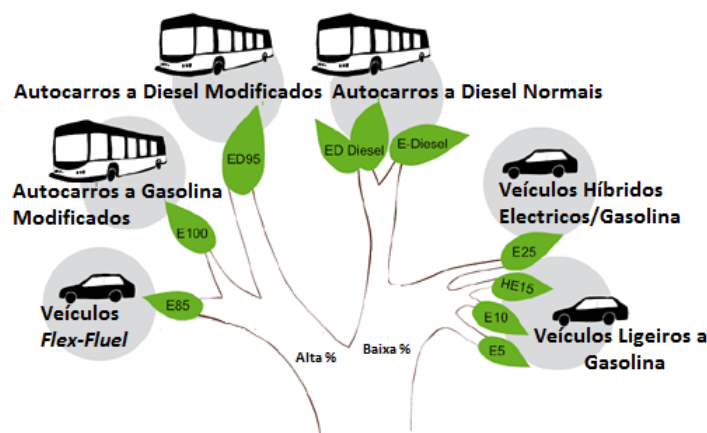


Figura 2.8 - Tipos de Misturas de etanol e respectivos veículos (Fonte: adaptado de [35])

Os veículos *Flex-Fuel* (Flexíveis em combustível), são veículos que podem utilizar diferentes tipos de combustível, não são o mesmo que veículos híbridos que usam dois depósitos diferentes para cada tipo de combustível, estes veículos são desenhados para funcionarem a gasolina ou com uma mistura até 85% de etanol ou metanol com gasolina e são idênticos aos veículos a gasolina normais, exceptuando pequenas modificações no motor e sistema de combustível [36]; [37].

2.5. Enquadramento legal

2.5.1. Políticas da União Europeia

Na União Europeia têm sido definidas várias metas e objectivos de forma a promover o uso e implementação de biocombustíveis. Estas políticas estão formuladas nos documentos oficiais da Comissão Europeia [38], sendo alguns destes documentos descritos na parte seguinte. A recente expansão do Mercado de biocombustíveis na UE é atribuída á legislação que promove as fontes de energia renovável em conjunto com os objectivos Europeus de segurança, competitividade e sustentabilidade energética [39].

De acordo com a **Directiva 2001/77/CE**, de 27 de Setembro de 2001 a biomassa é “a fracção biodegradável de produtos e resíduos da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais),

da floresta e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.”

A **Directiva de Electricidade Renovável** (*Directive of “Green Electricity”* ou *Renewable Electricity*) definiu uma meta de **21%** de electricidade produzida em 2010 ser de origem de fontes de energia renovável [39]. Posteriormente, uma legislação semelhante foi definida para o sector dos transportes, a **Directiva de Biocombustíveis** (*Directive on Biofuels*), que estabeleceu metas de incorporação de biocombustíveis no mercado de **2%** até 2005 e de **5,75%** até 2010 [39].

No documento **“Plano de Acção para a Biomassa”** (*Biomass Action Plan*) [38]), várias acções são descritas que encorajam o uso de biocombustíveis para a produção de energia. No que diz respeito aos biocombustíveis o documento **“Estratégia da União Europeia no domínio dos biocombustíveis”** (*An European Strategy for Biofuels*) [38] define três objectivos alvos:

- Promoção dos biocombustíveis na EU e países em desenvolvimento, assegurar que a sua produção e uso é globalmente positiva para o ambiente e que contribuem para os objectivos da estratégia *“Lisbon Strategy”* tendo em conta factores de competitividade [38].
- Preparação para o uso dos biocombustíveis em larga escala melhorando a sua competitividade ao nível de custos através do cultivo optimizado de matérias-primas dedicadas, pesquisa nos biocombustíveis de 2ª geração e apoio para a sua penetração no mercado com a implementação comercial de projectos de demonstração e remoção de barreiras não tecnológicas [38].
- Explorar as oportunidades para os países em desenvolvimento, incluindo aqueles afectados pela reforma do regime do açúcar da EU, para a produção de biocombustíveis e das suas matérias-primas e para definir o papel da EU em apoiar o desenvolvimento sustentável da produção de biocombustíveis [38].

Ao abrigo da **“Directiva 2003/30/CE para a Promoção da Utilização de Biocombustíveis ou de outros Combustíveis Renováveis nos Transportes”**, a UE estabeleceu o objectivo de alcançar a percentagem de 5,75% de energia renovável nos transportes até 2010.

Em Abril de 2009, o Parlamento Europeu adoptou a **“Directiva para Promoção de Fontes de Energia Renovável”** (*Directive on the Promotion of Renewable Energy Sources*), conhecida como Directiva de Energia Renovável (*Renewable Energy Directive*) ou **EU-RED** [39]. A EU-RED essencialmente incorpora as duas anteriores directivas num instrumento único e mais ambicioso, que estabelece metas específicas a nível nacional voltadas para o objectivo global a nível europeu de 20% de energia renovável no consumo total de energia primária até 2020. Ao abrigo desta directiva, que revoga a anterior, esta percentagem de energia renovável nos transportes sobe para um mínimo de 10% em todos os estados membros até 2020 [40]. Em relação á expansão do uso de biocombustíveis na EU, esta directiva tem como objectivo assegurar apenas o uso de biocombustíveis sustentáveis, que criem uma redução de emissão de GEE sem impactes negativos na biodiversidade e usos do solo [40], sustentando a competitividade europeia e diversificando as fontes de fornecimento de combustíveis através do desenvolvimento de substitutos a longo-prazo dos combustíveis fósseis [4]. O objectivo de 20% energia renovável faz parte da **“Pacote climático/energético 20/20/20 da EU”** (*EU 20/20/20 energy/climate package*), também orientado para alcançar uma melhoria de 20% na eficiência energética e uma redução de 20% da emissão dos GEE. A **EU-RED** estabelece um objectivo em separado de incorporar 10% de energia renovável no sector dos transportes. Os estados membros são incumbidos de desenvolver Planos de Acção Nacional de Energia Renovável (*National Renewable Energy Action Plans* (NREAPs)) para fazer um levantamento do seu potencial e delinear estratégias individuais para o cumprimento dos objectivos e metas estabelecidos [39]. A mudança de metas sectoriais indicativas (para electricidade renovável em 2001 e biocombustíveis em 2003) para uma meta vinculativa geral (de 20%) para Energia renovável até 2020 representa a essência do EU-RED [39]. Nesta mudança, a directiva procura fornecer seguranças de investimento e flexibilidade de maneira a aumentar a percentagem de renováveis na Europa.

A **“Directiva da Qualidade de Combustíveis”** (*Fuel Quality Directive*, FQD), parte do “Pacote climático/energético 20/20/20”, exige uma diminuição das emissões dos GEE associadas aos combustíveis utilizados no sector dos transportes [39]. Esta directiva introduz alterações nas especificações do gasóleo e da gasolina. A curto-médio prazo a directiva permite a incorporação de biodiesel no gasóleo em qualquer proporção, para a gasolina estipula um limite máximo de 10% em volume de etanol [41]. No mapa da Figura 2.9 estão as metas obrigatórias de incorporação de biocombustíveis na Europa em 2010.

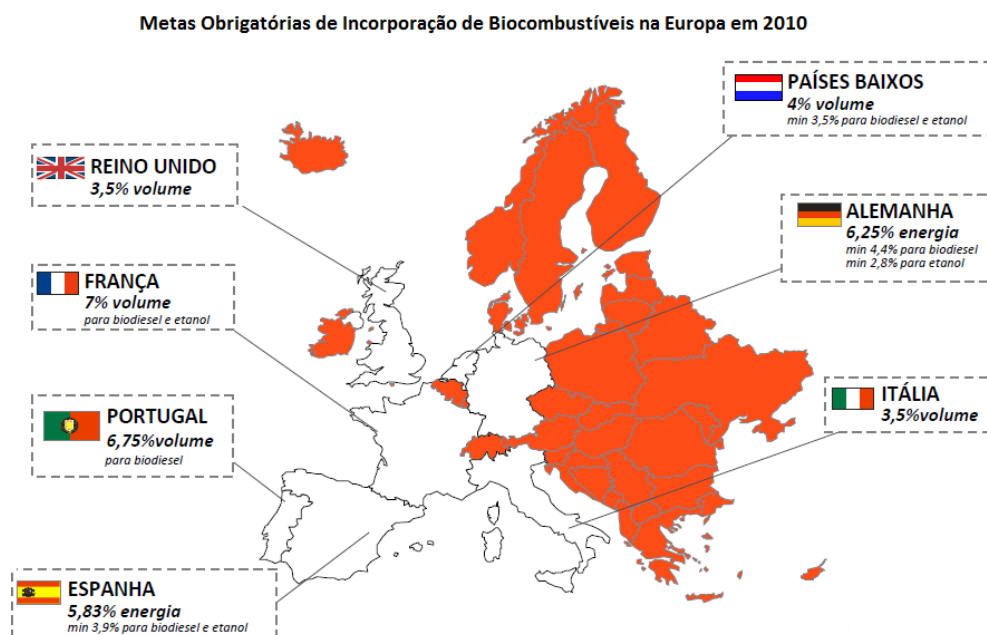


Figura 2.9 - Metas obrigatórias de biocombustíveis na UE -27 em 2010. (Fonte: Adaptado de [42])

A utilização de biocombustíveis é uma medida chave que os fornecedores de combustível irão implementar, visto ser tipicamente de custo inferior em relação a outras medidas como a redução de emissões nas refinarias de petróleo. O requisito de baixas emissões para os novos veículos de passageiros é outra componente do pacote da estratégia climática/energética, que atribui ainda mais crédito ao uso de biocombustíveis, incluindo os veículos *flex-fuel*. Assim é importante reconhecer que a expansão dos biocombustíveis na EU esta a ocorrer em reposta às várias directivas ou legislações e não apenas devido á EU-RED [39].

2.5.2. Políticas nacionais

Existem muitas estratégias a nível nacional para promover a introdução sustentável de biocombustíveis no mercado a longo-prazo, introduzir quotas para a substituição de todos os combustíveis fósseis e estímulo á introdução no mercado dos biocombustíveis de 2ª geração/avançados. Portugal, como estado membro da UE adoptou as Directivas Europeias dos biocombustíveis através do decreto de lei nº 62 de 2006 que transpõe a Directiva n.º 2003/30/CE da União Europeia.

O **Decreto-Lei nº62/2006 de 21 Março** transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva 2003/30/CE e estabelece uma meta indicativa de incorporação de biocombustíveis em 5,75%

(teor energético) até 31/12/2010 e promove e cria condições para a utilização de biocombustíveis e combustíveis renováveis, em substituição dos combustíveis fósseis. O **Decreto-Lei nº66/2006 de 22 Março**, altera o código dos IEC (imposto especial de consumo) consagrando isenção parcial e total do ISP (imposto sobre produtos petrolíferos e energéticos) aos biocombustíveis, quando incorporados na gasolina e gasóleo utilizados nos transportes. A **Portaria nº1391-A/2006 de 12 de Dezembro** fixa a quantidade máxima global de biocombustíveis a isentar apenas para a substituição do gasóleo, fixa a quantidade máxima anual de 100 000 toneladas por operador e fixa os critérios hierárquicos de atribuição da isenção do ISP; biodiesel a partir de matérias-primas endógenas, biodiesel a partir de óleos usados de origem nacional, biodiesel a partir de óleos importados, importação de biodiesel (privilegia a incorporação de matérias-primas nacionais). O **Decreto-Lei nº49/2009 de 26 de Fevereiro**, define quotas mínimas de incorporação obrigatória de biocombustíveis em gasóleo rodoviário, para 2009 de 6% em volume e para 2010 de 10 % em volume. O **DL nº 117/2010 de 25 de Outubro relativo à transposição dos art.º 17-19 e anexos III e V da directiva 2009/28/EC**, fixa as percentagens mínimas obrigatórias de incorporação de biocombustíveis (em teor energético) no consumo final de combustíveis no sector dos transportes terrestres, fixa os critérios de sustentabilidade, cria um sistema de emissão de títulos de biocombustíveis, promove através de incentivos financeiros as tecnologias mais sustentáveis e atribui ao LNEG a função de Entidade Coordenadora do Cumprimento dos critérios de Sustentabilidade. O **Decreto-Lei 281/2010 de 15 de Julho** procura garantir a sustentabilidade na produção de biocombustíveis, segundo 2 critérios: i) redução de emissões de GEE (em relação aos combustíveis fósseis equivalentes) em 35% até 31/12/2016, 50% para novas instalações, em 50% a partir de 01/01/2017 e em 60% a partir de 01/01/2018; ii) os solos utilizados no cultivo de matérias-primas para produção de biocombustíveis não podem ser ricos em biodiversidade (por exemplo, Floresta primárias, terrenos de pastagens até 2008) e não podem possuir elevado teor em carbono (por exemplo, zonas húmidas, zonas continuamente arborizadas ou sere turfeiras).

No âmbito do decreto-lei anterior, o governo criou um sistema de emissão de títulos de biocombustíveis que servem para comprovar o cumprimento das metas de incorporação de biocombustíveis e para serem transaccionados entre produtores de biocombustíveis e incorporadores (empresas petrolíferas) e entre incorporadores. Este sistema permite aos

incorporadores comprarem títulos de biocombustíveis a companhias que tenham títulos em excesso [43].

Na emissão de títulos de biocombustíveis tem de haver uma verificação do cumprimento das metas de incorporação. A emissão só é efectuada mediante a verificação dos critérios de sustentabilidade e o valor de 1 título de biocombustível corresponde a 1 tep de biocombustível incorporado [41]. Para promoção do uso de resíduos, de matéria-prima lenho-celulósica e de matérias-primas endógenas não-alimentares, o sistema de recompensação em títulos de biocombustível pelo uso destas matérias-primas foi elaborado de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Sistema de recompensação pelo uso de matérias-primas endógenas não-alimentares, lenho-celulósicas e de resíduos para produção de biocombustíveis. (Fonte: adaptado de [41])

Matéria-prima	Nº de Títulos de Biocombustível por unidade de tep incorporado
Resíduo	2
Celulósica não alimentar	2
Lenho-celulósica	2
Endógena não-alimentar	1,3
Endógena	1,1

2.6. Importância ambiental e sustentabilidade

Os biocombustíveis são uma opção que contribui para a segurança e diversificação do fornecimento de energia (combustíveis), redução da dependência do petróleo, desenvolvimento rural e redução da emissão dos gases efeito de estufa [11]. Os biocombustíveis avançados têm o potencial futuro para promover uma maior sustentabilidade do sistema energético e um maior aumento da redução de emissões de gases efeito de estufa [14]. No gráfico da Figura 2.10 são apresentadas as emissões de GEE de todo o ciclo de vida (em CO₂ equivalente por quilómetro) dos combustíveis fósseis, dos biocombustíveis de 1ª geração e os biocombustíveis avançados, onde é possível reparar nas emissões reduzidas dos biocombustíveis comparativamente aos combustíveis fósseis, dentro do círculo estão representados os biocombustíveis avançados.

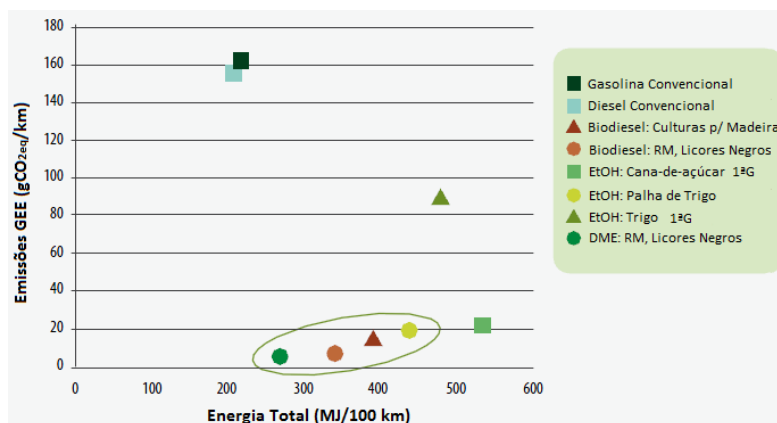


Figura 2.10 - Emissões de GEE em todo o ciclo de vida (CO₂eq por km) dos combustíveis fósseis vs biocombustíveis convencionais e biocombustíveis avançados. (Fonte: adaptado de [44])

Os biocombustíveis avançados têm uma maior flexibilidade no tipo de matéria-prima utilizada, ainda que os custos futuros sejam bastante incertos. As matérias-primas utilizadas na produção de biocombustíveis avançados têm grandes rendimentos energéticos relativamente à área utilizada (GJ/ha) comparativamente aos biocombustíveis convencionais, havendo uma maior produção de biocombustíveis, contribuindo para uma maior sustentabilidade. A produtividade de biocombustíveis avançados é da ordem das 2 a 4 toneladas por hectare e, considerando as algas, pode chegar às 8 toneladas por hectare [11]. Nos gráficos da Figura 2.11 estão representados os impactos típicos da produção de biocombustível de 1ª geração biodiesel de óleo de colza, e do biocombustível de geração avançada, etanol de palhas de trigo, onde se observa que o impacto do biocombustível de geração avançada é muito menor que o de primeira geração e que a etapa mais significativa no biocombustível de 1ª geração é o cultivo, com 63% das emissões de CO₂eq, enquanto a etapa mais significativa do biocombustível de geração avançada é o processamento da matéria-prima (conversão em biocombustível, com 50% das emissões.

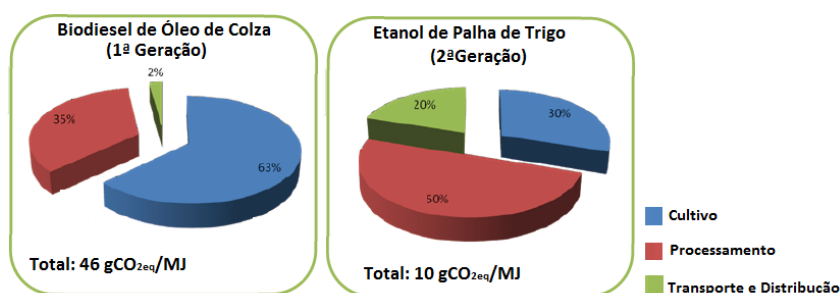


Figura 2.11 -Impacte da produção de biocombustíveis de 1ª e 2ª geração (Fonte: adaptado de [41])

O futuro dos biocombustíveis depende do desenvolvimento de políticas de apoio e de implementação tecnológica das novas opções promissoras de biomassa lenho-celulósica, algas, entre outros, e em estabelecer um nível de competição justo com os combustíveis fósseis, por exemplo, através do cálculo de emissões de gases efeito de estufa [11]. Com o preço crescente dos combustíveis fósseis e o aumento de problemas ambientais o desenvolvimento das tecnologias de conversão de biocombustíveis e a sua implementação é de grande importância, dado que o uso e produção dos biocombustíveis avançados são relativamente inofensivos para o ambiente, comparativamente com os combustíveis fósseis [15]. O carbono dos biocombustíveis foi recentemente extraído do dióxido de carbono atmosférico, no processo crescimento da biomassa/plantas, pelo que a combustão do biocombustível não resulta necessariamente num aumento líquido do dióxido de carbono da atmosfera [45]. Em 2008 foram estimadas reduções na ordem das **15,3** milhões de toneladas de CO₂eq resultantes do consumo de biocombustíveis na UE em vez de combustíveis fósseis, isto indica uma redução de 53%, comparativamente ao caso em que tivessem sido consumidos combustíveis fósseis em vez de biocombustíveis [46]. Na Tabela 2.2 é apresentada a redução de emissão de GEE resultante do consumo de biocombustíveis na UE em 2008, comparativamente aos combustíveis fósseis. A indústria dos biocombustíveis tem a possibilidade de criação de postos de trabalho, incentivando o desenvolvimento económico. Na Tabela 2.3 são apresentados os postos de trabalho estimados relacionados com a indústria da bioenergia, onde se observa que a nível global os biocombustíveis oferecem **1,5 milhões** de postos de trabalho.

Tabela 2.2 - Redução da emissão de GEE resultante do consumo de biocombustíveis na UE em 2008, comparativamente aos combustíveis fósseis. (Fonte: adaptado de [46])

	Produção Total em 2008 (PJ)	Emissão de GEE dos biocombustíveis (gCO ₂ eq/MJ)	Emissão GEE dos combustíveis fósseis (gCO ₂ eq/MJ)	Redução de emissões de GEE (Mton CO ₂ eq)
Bioetanol	73,9	31,6	83,8	3,8
Biodiesel	281,4	43,0	83,8	11,5
Total	355,3	39,3	83,8	15,3

Tabela 2.3 - Postos de trabalho estimados (x100) relacionados com a indústria da bioenergia em 2011. (Fonte: adaptado de [47])

	Global	China	India	Brasil	EUA	UE	Alemanha	Espanha	Outros
Biomassa	750	266	58	-	156	273	51	14	2
Biocombustíveis	1,500	-	-	889	100	151	23	2	194
Biogás	230	90	85	-	-	53	51	1,4	-

Os postos de trabalho considerados na Tabela 2.3 referem-se a toda indústria da bioenergia, directa ou indirectamente, por exemplo, desde os postos trabalho nas biorefinarias aos postos de trabalho do fabrico de equipamentos para esta indústria.

Existe uma grande polémica em torno dos biocombustíveis devido á sustentabilidade da sua produção, tendo em conta os impactes ambientais e a competição com a produção de alimento. A sustentabilidade dos biocombustíveis está dependente das suas vias de produção que podem ser insustentáveis num grande número de aspectos: a perda de habitat e desflorestação, degradação do solo, emissão de GEE, poluição da água, depleção de aquíferos, competição com o alimento, entre outros [10]. Uma quantidade de água significativa é necessária para o cultivo de culturas energéticas e para a conversão das matérias-primas em biocombustíveis, muitos processos de conversão podem conduzir a uma deterioração da qualidade da água através da intensificação da agricultura [10].

A redução das emissões de poluentes de um biocombustível quando comparado com os combustíveis fósseis depende da via de produção adoptado, podendo haver benefícios ou efeitos negativos [10]. A remoção dos resíduos agrícolas para a produção de biocombustíveis também levanta questões de impactes na qualidade do solo e emissões de CO₂ [10]. A produção de biocombustíveis pode ameaçar a biodiversidade quando há perda de habitat e impactes na qualidade do solo e da água.

A competição por área entre o alimento e as culturas energéticas também é motivo para preocupação, por exemplo, a grande expansão do etanol á base de milho em resposta aos preços crescentes do petróleo teve uma grande importância no aumento do preço do milho de 2006 a 2008 [10]. Muitas das opções para a produção de biocombustíveis em grande escala requerem grandes quantidades de área agrícola, mas a área agrícola produtiva é limitada e é um recurso valioso que fornece alimento para uma população global crescente. O incentivo do desenvolvimento de mais um grande uso para este recurso escasso é uma questão cada vez mais importante, especialmente visto que muitas práticas agrícolas têm impactes ambientais negativos [10].

Para acrescentar, a introdução da produção de biocombustíveis que seja competitiva com os combustíveis fósseis cria uma ligação entre os mercados agrícolas e os mercados energéticos, criando um perigo potencial de amplificar o impacto dos preços do petróleo nos preços dos alimentos [10]. Para contrariar este perigo, a produção de matérias-primas para os biocombustíveis tem de ser exclusivamente em áreas em que não haja competição directa com as áreas para a indústria alimentar, por exemplo, em áreas não aptas para a agricultura tradicional ou pastoreio, áreas de pousio, solo degradado, etc. ou com o uso de resíduos e

outros recursos que não interfiram directamente com a produção de alimento. De maneira a assegurar que esta produção de biocombustíveis seja sustentável têm de se criar medidas, políticas e instrumentos de fiscalização e verificação do cumprimento da legislação adoptada para garantir esta produção sustentável. No esquema da Figura 2.12 são apresentadas algumas questões relacionadas com a sustentabilidade dos biocombustíveis. A formulação de políticas requiere muita informação em relação aos aspectos económicos, ambientais e sociais destes biocombustíveis sustentáveis e ainda existe um grande nível de incerteza relacionado com estas questões sendo necessária muita informação adicional.



Figura 2.12 - Esquema com as questões relacionadas com a sustentabilidade dos biocombustíveis. (Fonte: adaptado de [7])

3. Tecnologias de produção de biocombustíveis avançados

Neste capítulo serão descritas algumas tecnologias de produção de biocombustíveis avançados que ainda estão em investigação e desenvolvimento, em fase piloto ou demonstração e são referidas como de geração avançada. Note-se que a descrição se refere a algumas das tecnologias das companhias líderes na produção de combustíveis avançados e alguns processos inovadores, podendo haver diversas variações destas. Estas tecnologias incluem a produção de biocombustíveis derivados de biomassa lenho-celulósica, como o etanol celulósico, o BtL diesel, o bio-SNG, entre outros, e incluem também as tecnologias inovadoras como a produção de biocombustíveis derivados das algas e a conversão de açúcares em biocombustíveis usando catalisadores biológicos ou químicos.

3.1. Processos de transformação base

A maioria dos processos de conversão das matérias-primas em biocombustíveis tem vários processos base que podem ser os mesmos para a produção de diferentes combustíveis, estes processos são descritos a seguir.

3.1.1. Gasificação

A gasificação é o processo termoquímico para produção de combustível gasoso através da oxidação parcial de um combustível sólido, neste caso, a biomassa, na presença de um agente oxidante externo [48]; [49]. Este processo termoquímico é semelhante à pirólise e consiste no tratamento térmico da biomassa com uma quantidade limitada de oxigénio e a temperaturas tipicamente acima de 750 °C. O calor da reacção necessário para a conversão da biomassa é fornecido pela sua combustão parcial [50]. Na gasificação a biomassa é sujeita a uma sequência complexa de reacções que envolvem fases sucessivas, como, a secagem, pirólise, oxidação e redução [51]. Estas reacções ocorrem entre os 500-1400 °C e a pressões de 1 a 33 bar [52]. Normalmente a gasificação da biomassa tem rendimentos superiores a 80% de transformação em gás de síntese [50]. Na Figura 3.1 está representada a reacção geral da gasificação.



Figura 3.1 - Reacção geral da gasificação (Fonte: [52])

O gás de síntese é uma matéria-prima intermédia com bastante importância para a indústria química, pois pode ser convertido num grande leque de produtos úteis, como os biocombustíveis e biohidrogénio. Os componentes primários deste gás são o hidrogénio (H_2) e monóxido de carbono (CO) e, em menores quantidades, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), hidrocarbonetos e azoto (N_2). O agente oxidante da gasificação pode ser ar, oxigénio, vapor ou uma mistura destes gases [52].

De acordo com os diferentes agentes de gasificação o gás de síntese obtido terá diferentes proporções entre os seus componentes. A gasificação com ar produz um gás de baixa qualidade com um poder calorífico entre 4 - 6 MJ/m³ que contém grandes quantidades de azoto, que é inerte, enquanto a gasificação com oxigénio produz um gás de alta qualidade com poder calorífico entre 10 - 20 MJ/m³ com grandes quantidades de hidrogénio e monóxido de carbono. Assim, para a produção de combustíveis o agente de gasificação utilizado deve ser o oxigénio devido às baixas quantidades de azoto e aos poderes caloríficos superiores do gás formado [52]. Os componentes típicos do gás de síntese, de acordo com os diferentes agentes de gasificação, são mostrados na Tabela 3.1. A gasificação a ar não é muitas vezes aplicável devido ao gás produzido conter elevadas quantidades de azoto, que mesmo inerte, aumenta o tamanho da fábrica e reduz a eficiência do processo e das unidades de operação, o que se traduz num aumento dos custos.

Tabela 3.1 - Composição do gás de síntese (em %) de acordo com os diferentes agentes de gasificação. (Fonte: adaptado de [52])

Agente gasificação	Ar	Oxigénio	Vapor	Vapor e oxigénio
CO	23	30	39	22
CO ₂	18	26	14	35
CH ₄	3	13	12	12
H ₂	12	25	30	30
N ₂	40	2	--	--

O gás de síntese após sair do gasificador é arrefecido, libertando calor que pode ser utilizado para produzir vapor. O sulfureto de hidrogénio é removido do gás de síntese, que é novamente arrefecido e purificado numa etapa de limpeza e posteriormente é comprimido e convertido em biocombustível num reactor de síntese. Existem diversos processos de síntese de biocombustíveis a partir do gás de síntese, por exemplo, a fermentação, hidrólise enzimática ou ácida, pirólise, a síntese Fischer-Tropsch e outras reacções catalíticas. Os combustíveis típicos obtidos através do gás de síntese são mostrados no esquema da Figura 3.2.

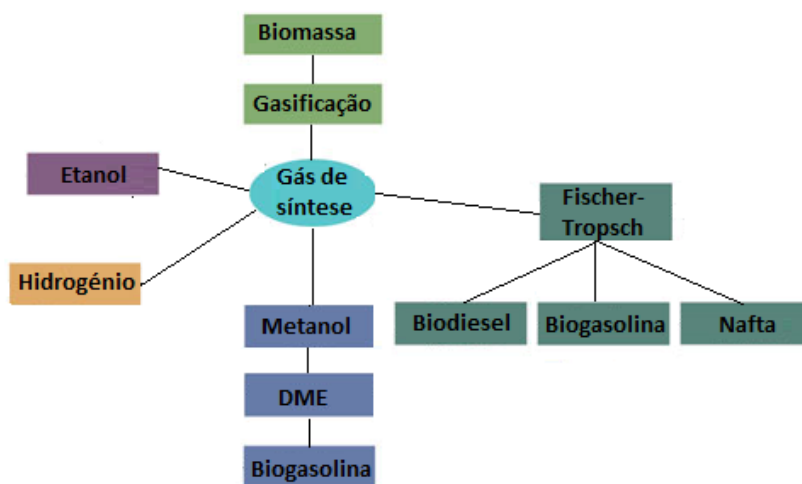


Figura 3.2 - Biocombustíveis produzidos a partir do gás de síntese obtido na gasificação. (Fonte: adaptado de [53])

Uma grande vantagem da gasificação de biomassa é o grande leque de recursos de biomassa disponíveis, desde culturas agrícolas e culturas especificamente energéticas a resíduos orgânicos e florestais. A matéria-prima tem uma grande variabilidade na qualidade, ainda assim o gás produzido é bastante “standard” e produz produtos homogêneos. Isto torna possível a escolha da matéria-prima que é mais económica e disponível em qualquer momento [48]. A biomassa sólida tem de ser preparada para alimentação num gasificador apropriado e a escolha do gasificador depende maioritariamente da escala e operação e do método de gasificação [53].

Devido á versatilidade do gás de síntese obtido na gasificação, esta é preferencialmente escolhida á pirólise rápida como pré-tratamento da biomassa para os processos de conversão. Existem muitas companhias que utilizam a gasificação como base nos seus processos, a *Enerkem*, a *Chemrec* e a *Choren* são umas das companhias líderes no desenvolvimento de processos de gasificação para a produção de biocombustíveis.

Tipos de gasificadores

São vários os tipos de gasificadores existentes, mas pode-se categoriza-los em três grupos principais: os gasificadores de leito em suspensão, os gasificadores de leito fluidizado, (borbulhante ou circulante), e os gasificadores de leito fixo, os de leito fixo são ainda subdivididos em gasificadores de contra-corrente, de fluxo paralelo ou de fluxo cruzado. As

principais diferenças dizem respeito á forma como os reagentes e produtos se movimentam pelo reactor/gasificador e as condições de reacção resultante. Os reactores/gasificadores podem ser operados a pressões atmosféricas ou a pressões superiores [48].

Gasificador de leito em suspensão

No gasificador de leito em suspensão a biomassa é gasificada em fluxo paralelo ou co-fluxo. As reacções de gasificação ocorrem numa nuvem densa de partículas ou gotículas muito finas. Altas temperaturas e altas pressões permitem uma alta carga no reactor. O gasificador é referido como produtor de cinzas e escória ou não produtor de cinzas e escória, se opera, respectivamente, abaixo ou acima da temperatura de fusão das cinzas da matéria-prima [49]. Na Figura 3.3 está representado o esquema de um gasificador de leito em suspensão típico.

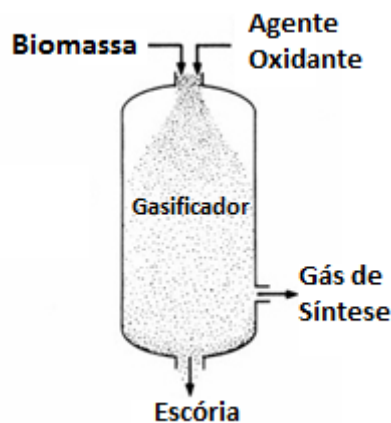


Figura 3.3 - Esquema de um gasificador de leito em suspensão. (Fonte: adaptado de [54])

Estes gasificadores necessitam que as partículas de biomassa sejam de pequenas dimensão, o que é um processo de custos elevados para biomassa sólida, assim a torrefacção é uma opção para o pré-tratamento desta para reduzir os custos de transporte e a dificuldade de trituração. Os sistemas de gasificação em leito suspenso são adoptados para níveis de processamento acima das 100 toneladas por hora de biomassa, equivalente a uma produção superior a 150,000 toneladas por ano de biocombustível [53].

Gasificador de leito fluidizado

No gasificador de leito fluidizado a biomassa e os materiais do leito são fluidizados por um agente oxidante. A introdução do agente oxidante pela parte de baixo, o leito expande-se no sentido vertical. Dependendo da velocidade do agente oxidante é obtido um leito fluidizado borbulhante (BFB – *bubbling fluidized bed*) ou um leito fluidizado circulante. Os gasificadores de leito fluidizado existem em inúmeros tipos, alimentados a oxigénio, alimentados a ar, a pressão atmosférica ou a altas pressões [49]. Na Figura 3.4 é apresentado o esquema típico de um gasificador de leito fluidizado.

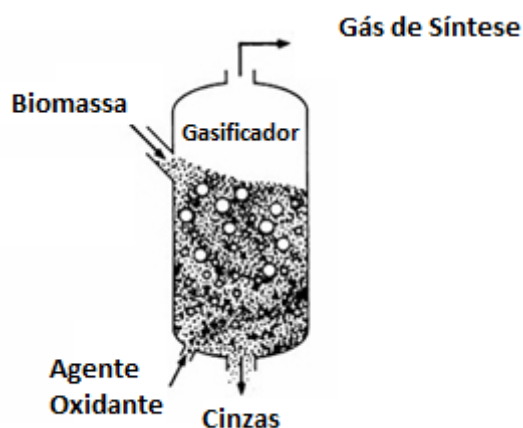


Figura 3.4 - Esquema típico de um gasificador de leito fluidizado. (Fonte: adaptado de [54])

Os gasificadores de leito fluido circulante são mais tolerante em relação ao tamanho das partículas, mas tendem a ser escolhidos para níveis de processamento mais reduzidos, de 20 a 100 toneladas por hora de biomassa seca, equivalente a uma produção de 30,000 a 150,000 toneladas por ano de biocombustível.

Os gasificadores de leito fluidizado borbulhante são especificamente utilizados para níveis de produção de 5 a 20 toneladas por hora de biomassa, equivalente a uma produção de 8,000 a 30,000 toneladas por ano de biocombustível [49].

Gasificador de leito fixo

Nos gasificadores de leito fixo, o leito permanece numa grelha, e são subdivididos em diferentes categorias. Os gasificadores de leito fixo em fluxo contra-corrente a biomassa é

alimentada no gasificador pelo topo e o gás produzido sai do gasificador também pelo topo, ou seja, a biomassa e o gás percorrem sentidos contrários, enquanto no gasificador de leito fixo em fluxo paralelo a biomassa é alimentada no reactor gasificador pela pelo topo mas o gás produzido sai pelo fundo. O tempo de retenção nestes gasificadores é longo e a velocidade do gás é lenta [49].

A vantagem do gasificador de fluxo em paralelo é a quantidade reduzida de alcatrões no gás produzido á saída do gasificador e a vantagem do gasificador em contra-corrente é não ser sensível a altas concentrações de humidade da matéria-prima, visto que o combustível alimentado no gasificador é seco pelo gás produzido á saída do gasificador. Como resultado os gasificadores em contra-corrente têm geralmente eficiências altas [49]. Na Figura 3.5 são apresentados os esquemas típicos dos gasificadores de fluxo em contra corrente (a) e de fluxo em paralelo (b).

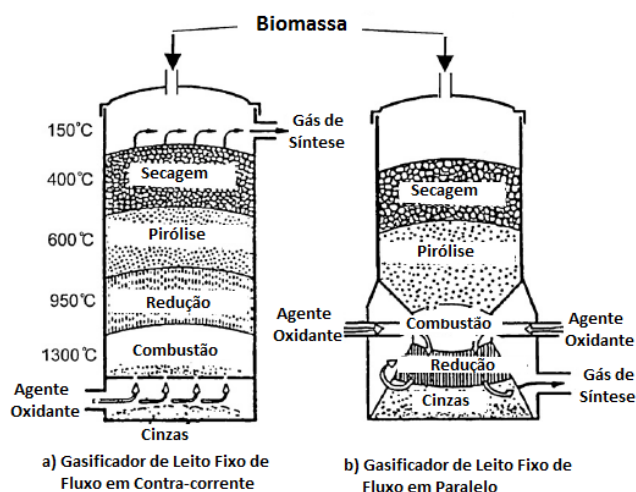


Figura 3.5 - Esquema típico dos gasificadores de fluxo em contra-corrente (a) e de fluxo em paralelo (b). (Fonte: adaptado de [55])

Gasificação indirecta

A gasificação indirecta a pressões atmosféricas possibilita evitar o uso de oxigénio mas uma etapa de compressão seria necessária para a síntese de biocombustíveis. O custo reduzido da gasificação a pressões atmosféricas pode compensar o custo adicional do compressor. A gasificação indirecta produz um gás com maior conteúdo em metano, contribuindo para a complexidade do processo e para os seus custos se o produto final desejado forem os

biocombustíveis, no entanto, para a produção de bio-SNG este processo apresenta vantagens [53].

Processo Carbo-V da Choren Industries

O processo de gasificação da Choren, carbo-V, começa com a secagem da matéria-prima a 15-20% de humidade e é triturado para dimensões inferiores a 50 mm. A matéria-prima é alimentada numa unidade de pirólise de baixa temperatura indirectamente aquecida e convertida em carvão e gás de pirólise. O carvão é arrefecido e pulverizado para a gasificação. O gás de pirólise é transportado para a câmara de combustão do gasificador de leito em suspensão e queimado com oxigénio para produzir calor na gasificação do carvão. A gasificação é feita a temperaturas na ordem dos 1400°C que permite a fusão das cinzas criadas e a quebra das moléculas dos alcatrões. O gás de síntese à saída do gasificador é limpo e convertido para as proporções adequadas de H₂ para CO para a conversão no biocombustível desejado. [56]; [57]

3.1.2. Síntese Fischer-Tropsch

A síntese Fischer-Tropsch é utilizada para produzir combustíveis sintéticos desde 1930. O processo foi desenvolvido pelo Prof. Franz Fischer and Dr. Hans Tropsch durante a segunda guerra mundial e tem sido utilizado desde então para produzir combustíveis em regiões onde os combustíveis derivados do petróleo não são permitidos devido a razões político-económicas. O preço crescente do petróleo e as preocupações ambientais despertaram novamente o interesse em combustíveis de Fischer-Tropsch [58].

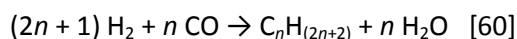
No processo de síntese de Fischer-Tropsch, o hidrogénio e monóxido de carbono do gás de síntese reagem com auxílio de catalisadores para formarem cadeias de hidrocarbonetos de vários comprimentos, incluindo GPL, nafta, parafinas, monómeros, gasolina, diesel etileno, propileno, butileno e etano. Os catalisadores utilizados são normalmente à base de ferro ou cobalto. A reacção ocorre a pressões de cerca de 20 -40 bar e a temperaturas na ordem dos 200 -250°C ou 300-350°C. Os catalisadores de ferro são geralmente usados a temperaturas mais elevadas para a produção de olefinas para gasolinas leves. Os catalisadores de cobalto são utilizados a temperaturas menores para a produção de cadeias longas de hidrocarbonetos

para a produção de diesel. Ambos os catalisadores podem ser utilizados em vários tipos de reactor.

Os principais requisitos do gás de síntese para o processo de Fischer-Tropsch são o rácio correcto de H_2/CO , baixo conteúdo de enxofre (10-100 ppb, o enxofre inibe a actividade dos catalisadores e reduz o seu tempo de vida), remoção de alcatrões, proporções baixas de gases não reactivos como metano e azoto.

A indústria *Choren*, uma das líderes no desenvolvimento de combustíveis líquidos a partir de biomassa através do processo Fischer-Tropsch e estima que a escala mínima de produção, para uma fábrica que utiliza o processo Fischer-Tropsch na produção de biocombustíveis, corresponde ao processamento de 1,500 toneladas por dia de biomassa, equivalente à produção 100,000 toneladas por ano de biocombustível. No entanto existem em desenvolvimento tecnologias que permitirão a redução desta escala de produção [59].

A produção de diesel através do processo de Fischer-Tropsch começa passando o gás de síntese por um reactor de Fischer-Tropsch onde é convertido em cadeias longas de hidrocarbonetos usando um catalisador. Os hidrocarbonetos são então separados e encaminhados para um processo de optimização onde o Fischer-Tropsch diesel é produzido. A típica reacção química no processo de Fischer-Tropsch é a seguinte:



A fracção " $C_n H_{(2n+2)}$ " corresponde aos hidrocarbonetos formados.

Reactores de Fischer-Tropsch

O componente principal no processo de Fischer-Tropsch são os reactores Fischer-Tropsch. Estes reactores são altamente exotérmicos e existem duas classes principais de reactores usados para produção de combustíveis Fischer-Tropsch, o reactor multitubular de leito fixo e o reactor de leito fluidizado. O reactor de leito fluidizado pode ser ainda subcategorizado em reactor de leito fluidizado circulante, reactor de leito fluidizado fixo e reactor de leito borbulhante com fase de "lamas". O reactor multitubular de leito fixo e o reactor de leito borbulhante com fase de "lama" são de interesse principal, visto estarem optimizados para a

produção de Fischer-Tropsch diesel [52]. Na Figura 3.6 estão representados os esquemas típicos dos reactores de Fischer-Tropsch.

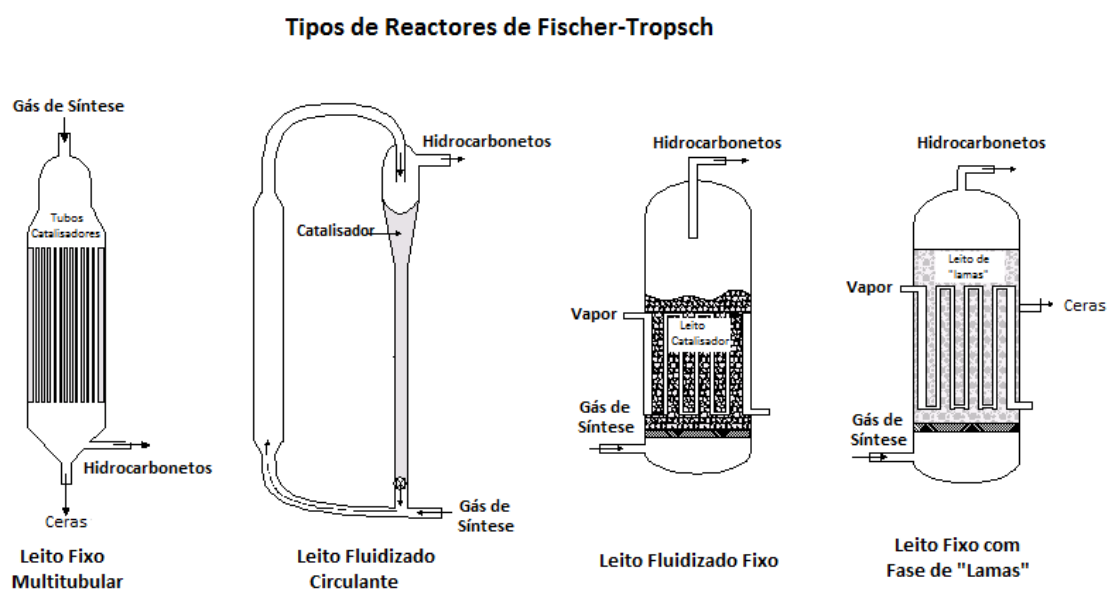


Figura 3.6 - Esquemas típicos dos reactores de Fischer-Tropsch. (Fonte: adaptado de [52])

3.1.3. Pirólise

Pirólise é a decomposição térmica da biomassa na ausência de um agente oxidante, onde as partes voláteis da matéria-prima são vaporizadas por aquecimento. A reacção forma três produtos: vapor que pode ser condensado em bio-óleo (óleo de pirólise), gases (leves, CO e CO₂) e um resíduo que consiste em carvão e cinzas [61].

Reacção de pirólise



Figura 3.7 - Reacção geral de pirólise. (Fonte: [51])

O processo de pirólise rápida, diferente da pirólise convencional, serve para maximizar a parte líquida e necessita de um aquecimento rápido, na ordem dos 400 -600 °C, na ausência de oxigénio, e um rápido arrefecimento para 100°C para obter um óleo condensado e reduzir

reações secundárias... Este óleo de pirólise pode ser refinado em diesel renovável, gasolina e combustível de aviação. Os líquidos e sólidos resultantes podem também ser misturados e utilizados para formar uma “bio-lama” que pode ser utilizada na gasificação. Este processo é mais eficiente que a pirólise lenta convencional, resultante num bio-óleo de melhor qualidade [61].

A pirólise permite a utilização de partículas de biomassa de maior tamanho (5mm) reduzindo custos de pré-tratamento em comparação com outros processos. É um processo que é muito intenso energeticamente e forma produtos diferentes dependendo da extensão a que o aquecimento e arrefecimento ocorrem. O óleo de pirólise pode ser bastante ácido e corrosivo o que requer maior custos de manuseamento e armazenamento. Um co produto é o bio-carvão que pode ser utilizado como combustível sólido ou fertilizante. [14]; [48]; [59]; [61]

A pirólise rápida pode ser utilizada como um útil pré-tratamento prévio à gasificação, pois permite melhores rendimentos e qualidades do gás produzido, e o transporte do bio óleo para a unidade de gasificação é mais fácil que o da biomassa em bruto [50]; [24]. Na Figura 3.8 está representado o esquema de um reactor de pirólise.

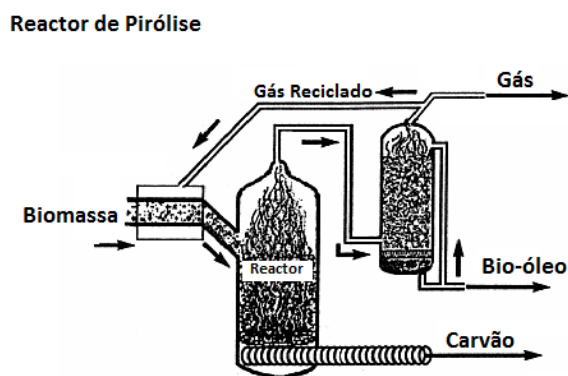


Figura 3.8 - Esquema de um reactor de pirólise. (Fonte: adaptado de [62])

3.1.4. Outros processos

Hidrólise enzimática

Hidrólise enzimática é uma reacção heterogénea de várias etapas em que a celulose insolúvel é inicialmente quebrada numa interface solido-liquido através da acção sinérgica das

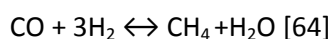
endoglucanases e exoglucanases. Esta reacção converte a biomassa lenho-celulósica em açúcares fermentáveis [63].

Fermentação

A fermentação é o método primário da conversão de açúcares presentes na biomassa em álcoois (biocombustíveis) e a base da maioria dos processos bioquímicos. A fermentação de matéria-prima lenho-celulósica é relativamente complicada devido á sua complexidade [8].

Metanização

A metanização é um processo físico-químico para produzir metano de uma mistura de vários gases, ou gás de síntese, vindos da fermentação ou gasificação termoquímica da biomassa. Os principais catalisadores desta reacção são o ruténio, cobalto, níquel e ferro. A metanização é descrita pela seguinte reacção:



Este processo é utilizado para produzir um substituto do gás natural e é a reacção reversa de “*steam methane reforming*” que converte metano em gás de síntese [64].

Os reactores de metanização podem ser classificados em varias categorias, por exemplo, leito fixo, leito fluidizado e outros tipos. De entre as tecnologias existentes a companhia *Tremp* desenvolveu uma tecnologia que tem em consideração a recuperação de calor sob forma de vapor a alta pressão de forma eficiente, devido aos seus catalisadores capazes de operar a altas temperaturas, na ordem dos 700°C [65].

Na secção seguinte são apresentadas, em tabelas, as características tecno-económicas das tecnologias analisadas para cada tipo de matéria-prima. Os parâmetros considerados foram o *input* de matéria-prima em relação ao *output*, a eficiência do processo, os custos de investimento e os custos fixos (todos os custos são em €2010). O tempo de operação destas tecnologias é entre 7200-8400 horas por ano e têm tempos de vida entre 20-25 anos.

3.2. Licores Negros

O **Licor negro**, na indústria do papel, é um fluido processual produzido à saída do digestor. É o elemento que é responsável pela cozedura da madeira para retirar componentes indesejáveis ao processo de fabricação do papel, tais como a lenhina, 1 e é um líquido renovável [66].

As fábricas de produção de pasta de papel separam as fibras de celulose da lenhina e de outros componentes da madeira. As “aparas” de madeira e licor branco (*white liquor*) são introduzidos na unidade de digestão e a lenhina e material orgânico dissolvem-se no licor branco e saem do digestor como licor negro [67]. Os químicos inorgânicos do fabrico de pasta de papel presentes no licor negro são reciclados e reusados novamente no processo de produção da pasta de papel, forma de licor verde [66]. O licor negro é tradicionalmente queimado numa caldeira de recuperação para recuperar os químicos que produção da pasta de papel, gerar vapor e electricidade, para a fábrica de papel [67]. No esquema da Figura 3.9 está representado o processo geral de produção dos licores negros numa unidade de produção de pasta de papel convencional e numa unidade de produção de pasta de papel em que a caldeira de recuperação foi substituída por um gasificador para a produção de gás de síntese.

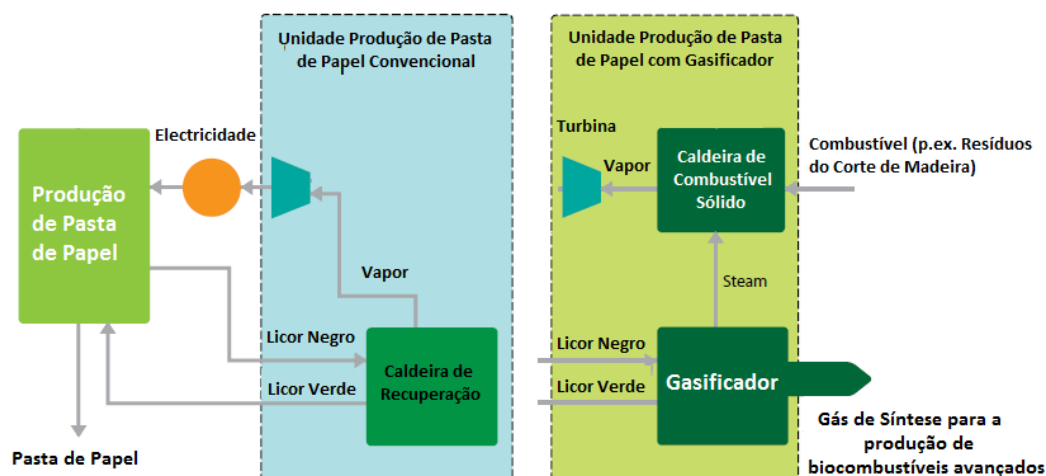


Figura 3.9 - Produção de pasta de papel convencional e esquema com a produção de gás de síntese. (Fonte: adaptado de [66])

Os licores negros contêm grande potencial calorífico e podem ser utilizados na produção de combustíveis líquidos ou gasosos, tais como, DME, CH₄ (metano), MeOH (metanol), hidrogénio

(H₂), entre outros. O seu conteúdo energético é de cerca de 14MJ/kg e tem consistência semelhante á do petróleo [66].

A produção de biocombustíveis a partir dos licores negros é principalmente feita através da gasificação dos licores negros (biomassa), pois estes têm propriedades únicas para a gasificação, tais como: i) É líquido e é facilmente alimentado no gasificador o que permite uma fácil atomização em pequenas gotículas; ii) É altamente reactivo devido às altas concentrações de sódio e potássio. Estas propriedades fazem com que a gasificação do licor negro seja fácil e mais rápida que para outros tipos de biomassa [68].

Potencial de redução de emissões

Comparado com o uso de combustíveis fósseis os produtos com origem nos licores negros (fabricados a partir de licores negros) oferecem um decréscimo até 95% dos gases efeito de estufa. Cálculos efectuados demonstraram que, na Suécia, é possível reduzir a emissão de GEE em 10% ou 6 milhões de toneladas de CO₂eq, substituindo um quarto dos combustíveis fósseis utilizados no sistema de transportes por biocombustíveis feitos á base de licor negro. Este facto é benéfico para o ambiente e significa uma redução do grau de dependência energética [66].

3.2.1. Produção de DME/Metanol

Na produção de DME/metanol, após a gasificação dos licores negros e síntese de DME/metanol, este é posteriormente destilado e é obtido um produto limpo. Vapor e energia adicional, necessários para as unidades de compressão, síntese e destilação, são produzidos numa caldeira adjacente que é alimentada com biomassa extra. O sistema de gasificação dos licores negros para a produção de combustíveis é demonstrado no esquema da Figura 3.10.

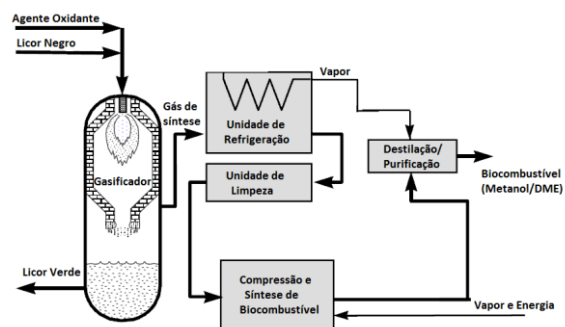


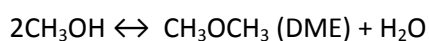
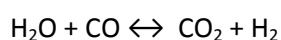
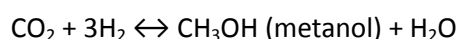
Figura 3.10 - Esquema típico da produção de biocombustíveis a partir dos licores negros. (Fonte: adaptado de [29])

O extraordinário output de metanol/DME deste sistema de gasificação de licores negros oferece o potencial para reduzir significativamente o uso de combustíveis fósseis no sistema de transportes. Em suma, o metanol/DME “verde” através dos licores negros e biomassa substitui a energia vinda de combustíveis fósseis [69].

Gasificação térmica do licor negro para produção de DME

Oxigénio obtido numa unidade criogénica de separação de ar (pureza > 99 vol.%) é fornecido como meio de gasificação ao gasificador térmico. As altas temperaturas (950-1000°C) permitem altas concentrações de H₂ e CO no gás. O calor do gás de síntese a altas temperaturas é recuperado numa unidade de arrefecimento para produzir vapor a alta e média pressão. [67]

Para a purificação do gás de síntese o processo rectisol é associado ao processo de remoção de CO e é utilizado na remoção dos compostos de enxofre, como H₂S. Após a purificação a composição do gás é ajustada de acordo com as necessidades para a síntese de DME /ou metanol, o CO₂ formado é removido e numa unidade de absorção. O gás limpo e ajustado estequiometricamente é comprimido de 30 para 100 bar, esta compressão é necessária para a síntese de DME [67]. Durante o processo o gás de síntese é convertido em metanol e DME num reactor catalítico de acordo com as seguintes reacções:



A mistura (de metanol e DME) produzida é condensada numa unidade de refrigeração e enviada para outro reactor para a conversão do metanol em DME. O DME “bruto” é purificado numa unidade de destilação antes de ser exportado como combustível. Sendo a reacção de síntese de DME exotérmica, o calor libertado é utilizado para pré-aquecer a caldeira de alimentação [67]. Na Tabela 3.2 estão as características tecno-económicas da gasificação térmica de licores para produção de DME.

Tabela 3.2 - Características tecno-económicas da gasificação térmica de licor negro para produção de DME (processo Chemrec).

Techs	Input (/1 output)	Ef	Custo Inv. €/(GJ/a)	Custo Fixo €/(GJ/a)	Ref
BL – DME CBLG	1,74 BL 0,38 Bm	56%	52	6,2	[2]; [29]; [67]; [70]

BL –Black Liquors – licores negros CBLG –Chemrec black liquor gasificação

3.2.2. Produção de metano

Gasificação catalítica hidrotérmica para produzir metano CH_4 , é considerada como uma alternativa de substituição da caldeira de recuperação convencional. É importante mencionar que os licores negros nunca foram testados num gasificador catalítico hidrotérmico numa fábrica piloto, apenas poucos estudos experimentais foram efectuados [29]. Nesta tecnologia assume-se que o licor negro tem um comportamento semelhante ao da biomassa húmida (>70%humidade) em condições supercríticas de água.). As altas concentrações de água em condições supercríticas nos licores negros aumentam as reacções de gasificação e a produção de gás de síntese [29]. Este fenómeno ajuda a encaminhar os licores negros directamente para o gasificador hidrotérmico dispensando a energia necessária em unidades de evaporação dos processos convencionais e reduz a necessidade de vapor das unidades de fabrico de pasta de papel.

O licor negro da unidade de digestão é introduzido no gasificador catalítico hidrotérmico em condições de água supercríticas, temperatura na ordem dos 600°C e pressão de 300 bar. A gasificação hidrotérmica consiste em duas unidades, a unidade de decomposição (fase de aquecimento) e o reactor catalítico com separação de sais. Durante a fase de aquecimento, as moléculas maiores dos licores negros hidrolisam para formar álcoois devido á presença de

lenhina [29]. A celulose presente na lenhina decompõe-se rapidamente na água a cerca de 250°C. O reactor catalítico é a unidade de síntese de metano onde as moléculas mais pequenas, como o ácido carboxílico, álcoois e aldeídos são convertidos em CH₄, CO₂, H₂ e CO [29]. A formação de alcatrões é evitada devido às condições supercríticas e á presença de catalisadores [29]. As seguintes reacções traduzem a conversão de ácido carboxílico em CH₄ e CO₂ :



Para a purificação do metano CH₄, o processo selexol é utilizado em conjunto com polietileno glicol dimetil éter (*polyethylene glycol dimethyl ether* (DMPEG)) como solvente. Na Tabela 3.3 estão as características tecno-económicas da gasificação catalítica hidrotérmica do licor negro para produção de CH₄.

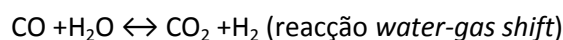
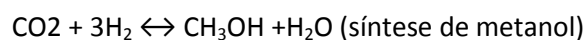
Tabela 3.3 – Características tecno-económicas da gasificação catalítica hidrotérmica do licor negro para produção de CH₄ (processo da Chemrec).

Techs	Input (/1 output)	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
BL – CH ₄	0,96 BL 0,33 Bm	55-69%	29	11	[50]; [67]

BL –Black Liquors – licores negros Bm -Biomassa

3.2.3. Produção de Metanol

A produção de metanol a partir dos licores negros começa basicamente como a produção de DME, CH₄, FTD e H₂. Os licores negros são gasificados e convertidos no gás de síntese. Após arrefecimento, remoção de enxofres e CO₂ e da conversão do CO, o gás de síntese é encaminhado para um reactor onde o hidrogénio, CO, e CO₂ são convertidos em metanol de acordo com as seguintes reacções [29]:



A reacção “water-gas shift” é uma reacção química em que o CO reage com vapor de água para formar CO₂ e H₂. Para purificar o metanol produzido, um sistema de destilação de três colunas é utilizado e após este processo o metanol é de 99% de pureza.

Os gasificadores utilizados neste processo são gasificadores do tipo de leito de leito em suspensão e o agente de gasificação é oxigénio e a gasificação é feita a temperaturas de cerca de 1000°C e a pressões de 30 bar [29]. O processo síntese do metanol é feito através do uso de catalisadores, como cobre e óxido de zinco, e as condições de síntese típicas são de cerca de 250°C de temperatura e pressões da ordem do 50 -100 bar [29]. Na Tabela 3.4 estão as características tecno-económicas da gasificação de licores negros para produção de metanol.

Tabela 3.4 – Características tecno-económicas da gasificação de licores negros para produção de metanol.

Techs	Input (/1 output)	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
BL - MeOH CBLG	1,5	59%	37,7	15,2	[29]; [50]; [71]

BL –Black Liquors – licores negros CBLG –Chemrec black liquor gasificação

3.2.4. Produção de hidrogénio

No processo de produção de hidrogénio através da gasificação, os licores negros são gasificados num reactor a altas temperaturas, na ordem dos 650-800 °C, e o conteúdo inorgânico é separado do gás de síntese. A conversão dos licores negros em hidrogénio é feita em três fases principais; **gasificação seca em leito de fluido circulante**, **conversão de CO** em CO₂ e **optimização do hidrogénio** com captura de CO₂ [72]. O gasificador é alimentado com oxigénio praticamente puro (99% de concentração), como agente gasificador, de forma a evitar altas concentrações de azoto do gás de síntese. Uma unidade criogénica de separação do ar é utilizada nesta etapa [72].

Gasificação seca de licores negros em caldeira de fluido circulante com causticização directa

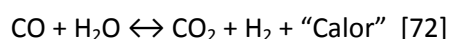
Neste sistema de gasificação seca de licores negros com causticização directa (*direct causticization*) a caldeira de recuperação tradicional é substituída por uma caldeira de fluido circulante, o fluido utilizado poderá ser, por exemplo, dióxido de titânio (TiO₂). A gasificação é a seco devido às temperaturas de gasificação serem inferiores ao ponto de fusão do conteúdo

inorgânico dos licores negros e estes serem recolhidos como sólidos secos após o processo. [72]

O gás de síntese à saída do gasificador contém uma quantidade considerável de vapor de água e algumas partículas. Para o processo ser energeticamente eficiente o calor associado ao vapor de água é recuperado para gerar o vapor de pressão no gasificador. No arrefecimento e remoção de partículas do gás é utilizado um condensador em contracorrente com um sistema de absorção de sulfureto de hidrogénio, H_2S . Uma solução de carbonato de sódio, Na_2CO_3 é usada como agente de absorção. O vapor rico em enxofre é reciclado e usado novamente no processo de produção da pasta de papel. O gás de síntese é assim arrefecido e purificado. [72]

Conversão de CO

Após a purificação o gás de síntese limpo passa por uma conversão de CO em CO_2 num reaktor usando água no processo e as temperaturas de operação são de 190°C e de 350°C. 36 A reacção de conversão de CO é descrita na equação seguinte:



O CO existente no gás é assim convertido em CO_2 e H_2 .

Optimização do hidrogénio com captura de CO_2

A optimização do hidrogénio inclui a separação do CO_2 do gás de síntese para obter uma pureza de hidrogénio alta como produto final. Existem muitas tecnologias disponíveis para captura de CO_2 , tais como, separação de gás por membrana, absorção física e “*pressure swing adsorption*” (que permite obter purezas de 99%). As pressões de operação variam entre 18 -36 bar e a temperaturas na ordem dos 30°C. O gás rico em CO_2 é sequestrado, de salientar que as tecnologias de captura e sequestro de carbono ainda não estão completamente desenvolvidas e maduras [72]. Na Tabela 3.5 estão as características tecno-económicas da gasificação seca de licores negros para produção de hidrogénio.

Tabela 3.5 - Características tecno-económicas da gasificação seca de licores negros para produção de hidrogénio (Processo Chemrec).

Techs	Input (/1 output)	Ef	Custo Inv. €/(GJ/a)	Custo Fixo €/(GJ/a)	Ref
BL – H ₂ DBLG-CFB	1,79	48%	53,45	11	[72]; [73]; [74]

BL –Black Liquors – licores negros DBLG –*Dry black liquor gasification*, CFB – leito de fluido circulante

3.2.5. Produção de Fischer-Tropsch diesel

Os licores negros são gasificados a temperaturas na ordem dos 950 -1000°C e a pressões de 32 bar, usando oxigénio como agente de gasificação e o gasificador é do tipo de leito em suspensão. O gás de síntese antes de entrar no reactor de Fischer-Tropsch é arrefecido para produzir vapor e o CO₂ e o enxofre são removidos por absorção em unidades “*Rectisol*”. É necessário obter um rácio de H₂/CO de cerca de 2 no gás de síntese para promover uma síntese de Fischer-Tropsch óptima e maximizar a conversão do gás de síntese em Fischer-Tropsch diesel [29].

O gás de síntese é alimentado no reactor Fischer-Tropsch a temperaturas de 210 °C e a pressão de 25 bar, onde são produzidos hidrocarbonetos a partir do gás de síntese. Após a saída do reactor os hidrocarbonetos mais pesados (C16+) são enviados para uma unidade de conversão de parafina pesada para optimização (quebra e isomerização) e separados em diferentes fracções para a destilação comum [29].

A produção de Fischer-Tropsch diesel é feita através do processo de Fischer-Tropsch a baixa temperatura e um reactor de fase de lamas com um catalisador de Cobalto (Co). Na Tabela 3.6 estão as características tecno-económicas da gasificação de licores negros para a produção de FT-diesel através do processo da Chemrec.

Tabela 3.6 - Características tecno-económicas da gasificação de licores negros para a produção de FT-diesel (Processo Chemrec).

Techs	Input (/1 output)	Ef	Custo Inv. €/(GJ/a)	Custo Fixo €/(GJ/a)	Ref
BL – FTD CBLG	2 BL	50%	56	9,3	[29]

BL –Black Liquors – licores negros CBLG –*Chemrec black liquor gasificação*

3.3. Biomassa

Os **resíduos florestais e da indústria da madeira** são obtidos na limpeza das áreas florestais e recolha de árvores para a indústria da madeira, onde são produzidas uma grande quantidade de resíduos, como ramos, cascas, serrim e aparas de madeira, resíduos do corte e desbaste de madeira e raízes. Cerca de 0,4 a 0,8 toneladas de resíduos de madeira podem ser obtidos de cada hectare de floresta [75]. Os **resíduos agrícolas** obtêm-se da indústria agrícola, onde são produzidos resíduos, como os restos vegetais, as palhas de trigo, de oleaginosas (p.ex. girassol), de milho, de cevada e de aveia e todos os caules, folhas, cascas, palhas e ramos que não são utilizados na produção agrícola. Existem vários tipos **culturas dedicadamente energéticas** que podem servir para a produção de biomassa lenho-celulósica, tais como, salgueiro, eulalia (*miscanthus*), gramíneas (*switchgrass*), choupo, eucalipto, cânhamo, álamo, acácia, *jatropha*, abeto e pinheiro.

3.3.1. Produção de DME

A biomassa é fornecida a um gasificador do tipo de leito fluidizado tendo ar como agente de gasificação. Antes de entrar no gasificador o ar é aquecido a 65°C para melhores desempenhos e o vapor proveniente do gerador de vapor é aquecido a 154°C. O gás de síntese obtido após a gasificação sofre uma remoção de partículas e arrefecimento e é usado para a síntese de DME à temperatura de 260°C e pressão de 40 bar [76].

A produção de DME também pode ser feita com a gasificação da biomassa utilizando basicamente os mesmos processos de gasificação utilizados na produção de DME a partir dos licores negros, mas obtendo-se diferentes eficiências entre os processos. Na Tabela 3.7 apresentam-se as características tecno-económicas da gasificação de biomassa para a produção de DME com o processo do *Biomass Research Center (BRC)*.

Tabela 3.7 - Características tecno-económicas da gasificação de biomassa para a produção de DME.

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm– DME (BRC)	2,5	55%	47	10	[9]; [50]; [76]; [77]
Bm –DME (Chemrec)	1,5	67%	47,4	11,6	[29]; [69]

Bm - biomassa

3.3.2. Produção de metanol

Produção de metanol a partir do gás de síntese da gasificação da biomassa (processo Chemrec)

O metanol pode ser produzido directamente a partir do gás de síntese obtido com a gasificação da biomassa através de diferentes reacções catalíticas, fazendo reagir CO, H₂ e pequenas quantidades de CO₂ sobre um catalisador. A reacção ocorre com uma reacção “water gas shift” e hidrogenação de CO₂.

Para a produção de metanol (CH₃OH), catalisadores de cobre (Cu), zinco (Zn) ou alumínio (Al) são usados e as reacções ocorrem a temperaturas da ordem dos 220-330°C e a pressões de 50-100 bar. O rácio de H₂/CO no gás de síntese é também importante e pode ser alterado com uma reacção de “water-gas shift” [29]; [59]; [78]. Na Tabela 3.8 estão as características tecno-económicas da produção de metanol a partir da gasificação da biomassa com o processo da companhia Chemrec.

Tabela 3.8 - Características tecno-económicas da produção de metanol a partir da gasificação da biomassa (Processo Chemrec).

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm – MeOH (gasificação)	1,5	66%	45,8	11,4	[29]

Bm - biomassa

Produção de metanol através de gasificação da biomassa com energia solar.

Neste processo existem seis secções principais: a gasificação, a reacção reversa de “water gas shift”, a síntese de hidrocarbonetos, a recuperação de calor e geração de vapor e o concentrador de calor a energia solar. Neste processo o gasificador é do tipo de leito fluidizado de partículas de olivina e é aquecido através de um sistema de concentração de calor a energia solar [79].

O obstáculo para esta tecnologia é transferir o calor a altas temperaturas do concentrador solar para o gasificador. O método adoptado foi o aquecimento de areia (Olivina, sendo também o catalisador da reacção de gasificação) com sal fundido da torre de concentração de calor. O gás de síntese é arrefecido e limpo, para a remoção de água, partículas, alcatrões e

impurezas, e comprimido e encaminhado para a unidade de conversão e seguidamente para o reactor da reacção reversa “*water-gas shift*” [79]. Adicionalmente H₂ da hidrólise da água impulsionada a energia solar é alimentado no reactor para converter o CO₂ em CO e ajustar o rácio H₂/CO, de maneira a satisfazer os requisitos de produção de metanol. O vapor produzido na unidade de recuperação de calor é utilizado para a gasificação [79].

Tabela 3.9 - Características tecno-económicas da gasificação de biomassa a energia solar para produção de metanol.

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm – MeOH (Gasificação a energia solar)	0,8	60,9%	10,1	1,3	[79]

Bm - biomassa

Produção de metanol através da gasificação da biomassa com captura de CO₂

Este processo é semelhante ao processo convencional de gasificação da biomassa para a produção de metanol, mas com o potencial de adicionar a captura e sequestro de CO₂. O carvão e resíduos produzidos no gasificador são queimados para fornecer calor á gasificação, no entanto, outros combustíveis, como gás natural ou biomassa adicional, podem ser fornecidos ao combustor. O CO₂ no gás de síntese formado no gasificador e dos gases de combustão são absorvidos usando uma tecnologia de captura de CO₂ baseada em aminas. O vapor é produzido recuperando o calor do gás de síntese e dos gases de combustão. Um sistema de turbinas associado á gasificação da biomassa gera parte da electricidade utilizada para pressurizar o gás de síntese antes da síntese do combustível e para a compressão do CO₂ a 200 bar para o seu transporte e captura [79]. O metanol produzido nestes processos pode servir para ser utilizado directamente como biocombustível ou como “input” para a síntese de DME ou para a síntese de Fischer-Tropsch.

Tabela 3.10 – Características tecno-económicas da gasificação da biomassa para produção de metanol com captura de CO₂.

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm- MeOH (gasificação)	2,35	42%	12	0,7	[79]

Bm - biomassa

3.3.3. Produção de hidrogénio

O processo de produção de hidrogénio a partir da gasificação da biomassa consiste maioritariamente na alimentação e secagem da biomassa, a gasificação, limpeza e condicionamento do gás de síntese, reacção de conversão de CO e a purificação do hidrogénio. Estes passos são integrados num ciclo de produção de vapor e electricidade.

O gasificador utilizado é do tipo de leito em suspensão a baixas pressões e o agente de gasificação é vapor. As temperaturas de gasificação são da ordem dos 700-1000°C e a pressões da ordem dos 1-2 bar [80].

A limpeza e purificação do gás de síntese consistem em usar um purificador dos alcatrões seguido de arrefecimento, compressão, remoção de enxofre, conversão de metano a vapor e conversão de CO. O gás é arrefecido para a temperatura de 150°C. No gás de síntese existe uma quantidade considerável de CO, CH₄ e outros hidrocarbonetos que necessitam de passar por uma conversão através das reacções *water-gas shift* e de conversão de CO. Os conversores a vapor operam tipicamente a temperaturas 815-870 °C e a pressões 15-36 bar usando um catalisador á base de níquel. Nesta etapa a maioria do CO e CH₄ é convertido em H₂ e CO₂ [80].

A purificação do hidrogénio é feita em unidades de adsorção por variação de pressão, (adsorção a vácuo), para a separação do hidrogénio dos outros componentes, maioritariamente o CO₂ e o CO e CH₄ que não reagiram. O hidrogénio obtido pode ter purezas superiores a 99,9% e as eficiências de conversão podem ser da ordem dos 85%. Na finalização do processo o hidrogénio é comprimido de 25 bar para 70 bar e encaminhado para um sistema de tubagens para ser distribuído [80]. Na Tabela 3.11 estão as características tecno-económicas da produção de hidrogénio a partir da gasificação da biomassa com o processo do NREL.

Tabela 3.11 - Características tecno-económicas da produção de hidrogénio a partir da gasificação da biomassa (Processo do NREL)

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm -H2 (gasificação)	2	45,6%	30,4	10	[50]; [80]

Bm - biomassa

3.3.4. Produção de Fischer-Tropsch diesel

O processo analisado para a produção de FT-diesel a partir de biomassa é o processo Carbo-V utilizado pela companhia alemã *Choren Industries*. Este processo consiste numa gasificação em três fases: gasificação a baixa temperatura (na ordem dos 500°C), gasificação a alta temperatura (na ordem dos 1200-1400°C) e tratamento térmico. O processo opera a pressões de 5 bar, produz um gás de síntese livre de alcatrões e metano, tem uma grande versatilidade no tipo de matéria-prima utilizada e contém uma secção de arrefecimento de água [81]; [82].

Tabela 3.12 - Características tecno-económicas da produção de FT-diesel a partir da gasificação de biomassa e síntese FT (Processo Choren).

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm-FTD (cEF-D FT)	2,2	54 -80%	63 -84	2,95	[70]; [81]; [82]

Bm – biomassa, cEF-D – FT- Fischer-Tropsch de leito em suspensão

A produção de FTD a partir da biomassa pode utilizar os mesmos processos que a produção de FTD a partir de licores negros, apenas criando diferenças nos custos e eficiências dos processos.

3.3.5. Produção de bioetanol

Processos bioquímicos

Sacarificação e fermentação simultânea

Processo com pré-tratamento de vapor catalisado á base de SO₃ seguido de sacarificação e fermentação simultânea (SSF). Neste processo de SSF a hidrólise enzimática e fermentação são efectuadas simultaneamente. Este passo é escolhido devido á sua alta produtividade e grande rendimento de produção de etanol, que conduz a uma redução de custos de produção quando comparado com a hidrólise e fermentação em separado [57]. Uma desvantagem é que a temperatura óptima para as enzimas situa-se entre os 40 – 50°C, mas devido á fermentação a temperatura é limitada a 37°C [57]. O passo de SSF é efectuado em fermentadores em agitação a 37°C. O fermento é muito difícil de reciclar pelo que é necessário produzir fermento

continuamente [57]. O etanol produzido no processo SSF é recuperado com destilação, desidratação e evaporação. A destilação e adsorção molecular são utilizadas para produzir etanol com concentrações de 99,8%. Os sólidos insolúveis são separados num filtro de prensa.

Tabela 3.13 - Características tecno-económicas da produção de etanol a partir de biomassa com SSF.

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm-EtOH (SSF)	2,6	60%	128,5	5,1	[57]; [83]; [84]

Bm - biomassa

Processo Blue Fire Ethanol – hidrólise ácida

Neste processo é utilizado ácido sulfúrico (35-90% por peso) para quebrar a celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis á temperatura de 35-65°C [56]. Após este passo são removidos os sólidos e é adicionado mais ácido a temperaturas entre 80-100°C para assegurar uma maior solubilidade dos açúcares [56]. A lenhina e outros sólidos são removidos e um processo de separação por membrana é utilizado para separar o ácido dos açúcares fermentáveis. A lenhina pode ser utilizada para gerar calor ou produzir electricidade. O ácido é recuperado e reconcentrado para ser utilizado novamente no processo de hidrólise. Na etapa seguinte os açúcares são fermentados e as impurezas removidas. Após a fermentação o etanol é destilado [56]. Este processo da companhia *Blue Fire Ethanol*, é um dos muitos processos existentes, pois existem várias companhias a competir pela comercialização das tecnologias de produção de bioetanol e não existe informação detalhada disponível sobre os processo e custos, na Tabela 3.14 estão as características tecno-económicas da produção de etanol através de processos bioquímicos, informação modelada pelo NREL com a informação que se encontra disponível no domínio público.

Tabela 3.14 - Características tecno-económicas da produção de etanol através de processos bioquímicos (modelado pelo NREL).

Techs	Input (/1 output)	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm - EtOH (Processo bioquímico))	1,7 0,06 e	52,2%	59,6	6,5	[56]

Bm – biomassa, e - electricidade

Processos termoquímicos - através da gasificação

No processo termoquímico em vez de se separarem os constituintes da biomassa e converter uma parte em etanol é utilizada a gasificação para converter a totalidade da biomassa em gás de síntese (syngas). O gás é depois convertido em produtos líquidos tipicamente através de processos químicos catalíticos (p.ex Fischer-Tropsch). Alguns dos processos termoquímicos utilizam bactérias para fermentar certos constituintes do gás de síntese. Este processo produz etanol e outros co-produtos químicos incluindo H_2 e NH_3 , os rendimentos de produção destes processos são inferiores aos dos processos catalíticos. Assim os processos termoquímicos considerados são apenas os químico-catalíticos. Os processos de gasificação variam muito em termos de “*design*” dos reactores, ambiente de gasificação e temperaturas e pressões de operação. Idealmente o gás de síntese produzido através do processo termoquímico tem altas proporções de CO e H_2 e baixas de CH_4 , hidrocarbonetos, alcatrões e gases inertes, como o azoto. Estas condições implicam processos de gasificação que operam a altas pressões e temperaturas (p.ex. gasificadores de leito em suspensão) e que previnam a mistura dos produtos de combustão com o gás de síntese [56]. Na Tabela 3.15 estão as características tecno-económicas da produção de etanol a partir da gasificação da biomassa, e da gasificação da biomassa com gás natural adicional (GN), valores modelados pelo NREL.

Tabela 3.15 - Características tecno-económicas da produção de etanol a partir da gasificação da biomassa (modelado pelo NREL).

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm - EtOH (Processo termoquímico)	1,9 0,05 e	37,8%	56,4	2,1	[56]
Bm+GN -EtOH (Processo termoquímico)	1,4 Bm 0,5 GN	44,8%	72,8	2,1	[56]

Bm – biomassa, GN – gás natural, e - electricidade

3.3.6. Produção de Bio-SNG

A metanização do gás de síntese é um processo estabelecido/maduro, no entanto, a optimização do processo em relação a eficiência energética (p.ex. recuperação de calor e minimização da energia de compressão) e o seu desenvolvimento é importante para a implementação desta tecnologia em maiores escalas. Convencionalmente a reacção de metanização ocorre num processo de três etapas num reactor cilíndrico com catalisadores.

Os catalisadores podem ser desactivados pelos compostos de enxofre e cloro e por rácios baixos de CO para H₂ levando a depósito de carbono elementar. A metanização do gás de síntese consome cerca de 20% da energia potencial do gás, logo é vital assegurar uma recuperação e uso eficiente da energia [85].

O bio-SNG pode ser produzido em fábricas existentes actualmente, a gasificação indirecta oferecem uma maior produção directa de metano, no entanto, os gasificadores pressurizados de leito fixo já foram demonstrados a uma escala apropriada, e não necessitam de desenvolvimento e já se encontram instalados para a produção de bio-sng [85]. Na Tabela 3.16 apresenta-se as características tecno-económicas da produção de bio-SNG através da gasificação da biomassa, valores modelados em [85] através de informação fornecida pelas companhias Choren, Enerkem, entre outras.

Tabela 3.16 - Características tecno-económicas da produção de bio-SNG através da gasificação da biomassa.

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
Bm – bioSNG (gasificação)	1,7	65%	49,6	3,5	[85]

Bm - biomassa

3.4. Resíduos sólidos urbanos

3.4.1. Produção de Fischer-Tropsch Diesel e Bio-SNG

A produção de FTD e Bio-SNG a partir de resíduos sólidos urbanos utiliza os mesmos processos que a produção de metano a partir da biomassa, apenas criando diferenças nos custos e eficiências dos processos. Na Tabela 3.17 estão as características tecno-económicas da produção de FTD e bio-SNG a partir de resíduos sólidos urbanos.

Tabela 3.17 - Características tecno-económicas da produção de FTD e bio-SNG a partir de resíduos sólidos urbanos.

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
RSU – FTD (gasificação)	2,4	74%	69,6	3,7	[8]; [78]; [86]; [87]
RSU – bioSNG (gasificação)	1,7	65%	57,7	3,5	[85]

3.4.2. Produção de bioetanol

Tipicamente as tecnologias de produção de etanol a partir de resíduos via termoquímica correspondem a um processo de 4 etapas: a preparação da matéria-prima, a gasificação, a limpeza e condicionamento do gás de síntese e a síntese catalítica de etanol. Este processo converte os resíduos em gás de síntese para a produção de bioetanol. O principal objectivo desta tecnologia é a produção de etanol a partir de matéria-prima lenho-celulósica. Num processo intermédio pode ser produzido metanol e vendido como produto final. O processo de produção de etanol opera a pressões e temperaturas relativamente baixas, o que reduz as necessidades energéticas e os custos e permite uma alternativa sustentável aos aterros e à incineração e é uma fonte de energia limpa [88]. Os gasificadores mais utilizados são do tipo de leito fluidizado borbulhante e as tecnologias existentes estão agora a ser implementadas a escala comercial [89].

A produção de bioetanol a partir de resíduos sólidos urbanos também utiliza os mesmos processos que a produção de bioetanol a partir da biomassa, apenas criando diferenças nos custos e eficiências dos processos. Na Tabela 3.18 mostram-se as características tecno-económicas da produção de bioetanol através de resíduos sólidos urbanos.

Tabela 3.18 - Características tecno-económicas da produção de bioetanol através de resíduos sólidos urbanos.

Techs	Input	Ef	Custo Inv. €/ (GJ/a)	Custo Fixo €/ (GJ/a)	Ref
RSU – EtOH (fermentação)	2,7	61%	55,7	3	[8]; [78]; [86]; [87]
RSU – EtOH (gasificação)	1,9	46%	106,5	4,3	[1]; [89]; [90]; [91]; [92]

3.5. Algas

O uso de algas como matéria-prima para a produção de bioenergia refere-se a um amplo grupo de organismos, incluindo, as microalgas, macroalgas (algas), e cianobactérias. As algas existem numa grande variedade de habitats naturais aquáticos e terrestres, desde água-doce e água salgada a solo e em relações simbióticas com outros organismos. O cultivo das microalgas consiste numa conversão eficiente da energia solar em biomassa com um ciclo de vida muito rápido quando comparado com o cultivo de outras culturas terrestres [23].

As microalgas e cianobactérias podem ser cultivadas através de métodos foto autotróficos (algas necessitam de luz para crescer e criar nova biomassa) em sistemas/lagos abertos ou fechados ou através de métodos heterotróficos (algas crescem sem a presença de luz e são alimentadas com uma fonte de carbono, como açúcares, para criar nova biomassa). As macroalgas têm diferentes necessidades de cultivo que tipicamente necessitam de uma costa marítima ou instalações costeiras. As escolhas feitas para o sistema de cultivo são um factor importante nos custos, escala de produção e sustentabilidade dos sistemas de biocombustíveis produzidos através de algas.

Vantagens do uso de algas como recurso

Algas podem ser um recurso preferencial para a produção de combustíveis líquidos de grande densidade energética. Existem inúmeros aspectos da produção de biocombustíveis derivados de algas que despertaram o interesse de investigadores e empreendedores por todo o mundo: i) A produtividade das algas oferece grandes rendimentos de biomassa por hectare de cultivo, ii) As algas podem utilizar águas residuais, águas doces ou águas salgadas reduzindo assim a competição pelo fornecimento de água potável iii) As estratégias de cultivo de algas podem minimizar ou eliminar a competição com solos cultiváveis e nutrientes utilizados para agricultura tradicional, iv) As algas podem reciclar o carbono das emissões ricas em CO₂ de fontes estacionárias como centrais térmicas e outros emissores industriais e v) A biomassa de algas é compatível com a visão de bio refinaria integrada para a produção de uma grande variedade de combustíveis e co produtos [24]. Na Tabela 3.19 é feita uma comparação dos rendimentos de óleos por unidade de área por tipo de cultura utilizado, podendo observar-se que os rendimentos de óleo com a utilização de culturas de algas são largamente superiores aos restantes.

Tabela 3.19 - Comparação de diferentes rendimentos de óleos por tipo de cultura utilizada. (Fonte: adaptado de [61])

Cultura	Rendimento de óleo (litros/ha*ano)
Soja	450
Camelina	560
Girassol	955
Jatropha	1 890
Palma	5 940
Algas	3 800 – 50 800

Fotobioreactores são sistemas fechados de tubos transparentes, placas, sacos ou cúpulas, existindo vários designs, tendo como função a produção de algas. Os tubos individuais têm tipicamente diâmetros de 3 a 10 centímetros, permitindo que a luz penetre até ao centro e têm de 25 a 100 metros de comprimento [61]. Estes contêm água doce ou água salgada, de acordo com a espécie de alga desejada e com intensidades luminosas de 6000 lux e temperaturas na ordem dos 30 °C, nestes sistemas existe um grande controlo sobre parâmetros físico-químicos podendo assim aumentar a produtividade de biomassa [23]. A produção de algas também pode ser feita em tanques abertos, em fermentadores heterotróficos fechados e em sistemas marinhos. Na Figura 3.11 estão exemplos de fotobioreactores e de tanques abertos.



Figura 3.11 - Exemplo de um fotobioreactor para produção de algas (esquerda) e produção de algas em tanques abertos no Hawaii (direita). (Fonte: [93]; [94]))

3.5.1. Produção de biocombustível directamente da alga

A produção directa de biocombustíveis através de fermentação heterotrófica e crescimento de algas, tem bastantes vantagens em termos de custos de processo devido á capacidade de eliminação de muitas etapas de processo (p.ex. extracção do óleo de alga) e os seus custos associados na produção de biocombustível. O crescimento heterotrófico também permite um bom controlo das condições de produção, podendo ser orientadas para crescimento de biomassa ou para produção de óleo. Estes sistemas podem permitir a uma grande produção de biomassa e uma grande percentagem de lípidos nessa biomassa, (sendo os lípidos o constituinte que se pretende utilizar). Estes sistemas estão prontos para se implementarem em certas escalas e têm um potencial enorme para fixar carbono (que reduziria os custos de produção). Esta abordagem é relativamente diferente da abordagem comum da produção de algas para extracção de bio óleo para consequente produção de biocombustíveis líquidos,

tipicamente o biodiesel. Existem inúmeros biocombustíveis que podem ser produzidos directamente das algas, incluindo álcoois (etanol, metanol, DME), alcanos (biogasolina e biodiesel) e hidrogénio. [24]

Produção de álcoois (etanol, metanol, DME)

As algas, como *Chlorella vulgaris* e *Chlamydomonas perigranulata*, são capazes de produzir etanol e outros álcoois através de fermentação heterotrófica (necessita de uma fonte de energia ou alimento externa) do amido. Este processo consegue-se com a produção e armazenamento do amido através da fotossíntese da alga, ou pela alimentação directa da alga com açúcares e subsequente fermentação anaeróbia destas fontes de carbono para a produção de etanol na ausência de luz. Se estes álcoois poderem ser extraídos directamente das culturas de algas os custos reduzem-se drasticamente e o processo é menos intenso energeticamente que outros processos de produção de biocombustíveis a partir das algas. Este processo essencialmente eliminaria a necessidade de separar a biomassa algal da água e extrair e processar os óleos. Normalmente estes processos são efectuados em fotobioreactores fechados que utilizam água salgada com cianobactérias metabolicamente melhoradas que produzem etanol e outros álcoois, sendo resistentes a altas temperaturas, salinidades e altas concentrações de etanol. Uma das vantagens principais é a possibilidade do sistema utilizar uma fonte de carbono barata como emissões indústrias, de centrais térmicas, etc, para acelerar o crescimento das algas nos bio reactores. [24]

Este processo pode consumir mais de 90% do CO₂ do sistema através da fotossíntese, onde uma percentagem do carbono dos açúcares produzidos é convertida em etanol [24]. O etanol é segregado para o meio de cultura, é recolhido do reactor, purificado e armazenado. Em adição ao etanol, é possível usar algas para produção de outros álcoois, como o metanol e butanol, usando processos semelhantes ainda que a recolha de álcoois mais pesados pode ser mais complexa.

Produção de alcanos

Os alcanos, como a biogasolina ou o biodiesel, podem ser produzidos directamente por vias metabólicas heterotróficas usando as algas. Em vez do crescimento de algas em sistemas e bio reactores fechados que utilizam luz solar e fotossíntese, as algas podem crescer dentro de

reactores fechados sem luz solar. Neste processo as algas são alimentadas com açúcares que estão disponíveis a baixo sendo um factor importante no custo do processo de produção de biocombustíveis, estes açúcares estão disponíveis em matéria-prima renovável como biomassa lenho-celulósica. Este processo pode usar variadas espécies de algas para produzir diferentes alcanos, algumas algas produzem uma mistura de hidrocarbonetos semelhantes a petróleo leve. Estes alcanos podem ser segredados e recolhidos sem necessidades de separação de água e extracção, mas muitas vezes estão associados às algas e necessitam desta extracção. Com pós-processamento, uma grande variedade de combustíveis pode ser produzida. O processo de crescimento de algas heterotroficamente pode apresentar vantagens em relação às tecnologias típicas á base de algas foto autotróficas. O crescimento na ausência de luz leva a que seja produzida uma maior quantidade de alcanos, isto acontece devido á supressão dos seus processos fotossintético o que activa outros processos metabólicos que convertem os açúcares em alcanos. [24]

O uso de algas pode servir para converter materiais celulósicos, como gramíneas, resíduos florestais, aparas de madeira, etc., em óleos para produção de biocombustíveis avançados pode ter vantagens em relação aos processos em desenvolvimento com outro tipo de microorganismos.

Produção de hidrogénio directamente das algas

A produção de hidrogénio derivado das algas tem recebido atenção significativa á muitas décadas. As tecnologias de produção biológica de hidrogénio (biohidrogénio), fornecem variadas abordagens para a sua produção, incluindo a biofotólise directa e indirecta, foto-fermentação e a fermentação na ausência de luz [24]. Existem muitos desafios e barreiras a ultrapassar para que a produção biológica de hidrogénio seja considerada uma tecnologia viável.

O futuro da produção biológica de hidrogénio depende não só em avanços na pesquisa e desenvolvimento, como o desenvolvimento de fotobioreactores avançados e aumento de eficiência através de algas geneticamente melhoradas, mas também em termos de considerações económicas, aceitação social e o desenvolvimento de uma infra-estrutura de hidrogénio robusta.

3.5.2. Produção de biocombustíveis a partir da alga inteira

Para além da produção de biocombustíveis directamente das algas, a alga inteira pode ser processada e convertida em biocombustíveis em vez de primeiramente se extrair óleos e serem pós-processados. Estes métodos beneficiam de custos reduzidos associados aos processos de extracção e há possibilidade de serem processadas uma grande variedade de algas, ainda que seja necessário algum nível de desidratação. As macroalgas têm sido objecto de interesse no que respeita a matéria-prima para gasificação. [24]

As quatro principais categorias de tecnologias de conversão que permitem o processamento da alga inteira são: a **pirólise**, **gasificação**, **digestão anaeróbia** e o **processamento supercrítico**.

Pirólise

A pirólise tem a vantagem principal de ser extremamente rápida, na ordem de segundos, em relação a outros métodos de conversão, mas a produção de diesel sintético directamente a partir da pirólise das algas ainda não é possível, apenas bio óleo é possível produzir e que pode entrar no directamente no fluxo das refinarias pra produção de diesel [24] ou ser hidroprocessado para a produção de gasolina, diesel e combustível de aviação renováveis [61].

O uso das algas para a pirólise rápida tem a grande vantagem de não necessitam de ser triturada em pequenas partículas, porque existem fundamentalmente em pequenas unidades e não têm tecido fibroso [61]. Um obstáculo significativo no uso da pirólise para conversão de algas é o seu conteúdo de humidade e a desidratação que é necessária para o processo funcionar eficientemente. Adicionalmente, é necessário ser feita pesquisa sobre os processos de conversão catalítica do bio óleo das algas em biocombustíveis [61].

Gasificação

A gasificação das algas pode fornecer uma forma extremamente flexível de produzir diferentes combustíveis líquidos com o gás de síntese, através da síntese Fischer-Tropsch ou outros tipos de síntese. A síntese de álcoois usando a gasificação da biomassa lenho-celulósica encontra-se relativamente madura, uma vez que o conteúdo de humidade for ajustado, a gasificação de

algas para produção de biocombustíveis será simples, ou seja, é aplicável o uso de algas como matéria-prima para a gasificação e infra-estrutura termoquímica existente [61].

Liquefacção

A liquefacção hidrotérmica directa em condições de água supercríticas (definidas como a conservação do estado líquido da água a temperaturas superiores a 100°C, através da aplicação de pressão) é uma tecnologia que pode ser implementada para converter biomassa algal húmida em vários biocombustíveis líquidos. Esta tecnologia é uma representação dos processos geológicos naturais conhecidos na formação do petróleo, em escalas de tempo enormemente reduzidas. A alta actividade da água em condições supercríticas permite a decomposição da biomassa algal em moléculas mais pequenas com mais densidade energética. O produto principal do processo de liquefacção é o “bio-crude”, com normalmente 45% humidade e conteúdo energético semelhante ao diesel, que pode ser convertido em combustíveis. Já foi efectuada a produção de bio-óleos a partir de diferentes espécies de algas, a temperaturas de cerca de 300°C e a pressões de 100 bar, com eficiências de conversão de 64% [61].

A liquefacção é considerada uma abordagem tecnologia promissora, sendo ainda necessário trabalho de pesquisa e desenvolvimento para se tonar numa opção comercialmente viável

Processamento supercrítico

O processamento supercrítico constitui uma inovação das tecnologias capazes de simultaneamente extrair e converter óleos em biocombustíveis [61]. Os fluidos supercríticos são selectivos, no entanto produzem produtos de alta pureza e elevadas concentrações. A extracção é eficiente a temperaturas moderadas, por exemplo, inferiores a 50°C, assegurando a estabilidade e qualidade dos produtos. A desidratação das algas não é necessária, aumentando a eficiência do processo.

O custo de processamento das tecnologias supercríticas pode ser cerca de metade dos custos dos métodos convencionais de transesterificação. Assim, é teoricamente possível que o processamento de algas seja competitivo economicamente com os combustíveis fósseis. [61]

Digestão anaeróbia da alga inteira

A digestão anaeróbia é uma reacção bioquímica que reduz compostos orgânicos complexos, como as algas, em metano e CO_2 na ausência de oxigénio. O metano resultante pode ser comprimido e usado como combustível na forma de gás natural. Tipicamente três grupos de bactérias são usados na digestão anaeróbia. A alga inteira entra no digestor, onde os lípidos são quebrados em ácidos gordos, os hidratos de carbono em monossacarídeos e as proteínas em aminoácidos. Esta etapa é referida como hidrólise e contém enzimas segregadas pelas bactérias fermentativas e hidrolíticas. Na etapa seguinte as bactérias acetónicas convertem os ácidos e álcoois em acetatos, CO_2 e H_2 . Finalmente, as bactérias metanogénicas completam a conversão destes produtos em CO_2 e metano. [61]

A digestão anaeróbia remove certos obstáculos associados aos processos de conversão das algas em biocombustíveis, por exemplo a desidratação das algas e extracção de óleos, podendo traduzir-se numa redução dos custos. Os digestores anaeróbios não são selectivos em relação ao tipo de algas utilizado pelo que variadas espécies de algas poderão ser utilizadas, por exemplo as algas do tratamento de águas, que podem crescer descontroladamente. [61] Na Figura 3. está representado o esquema das vias potenciais da conversão da alga inteira em biocombustíveis.

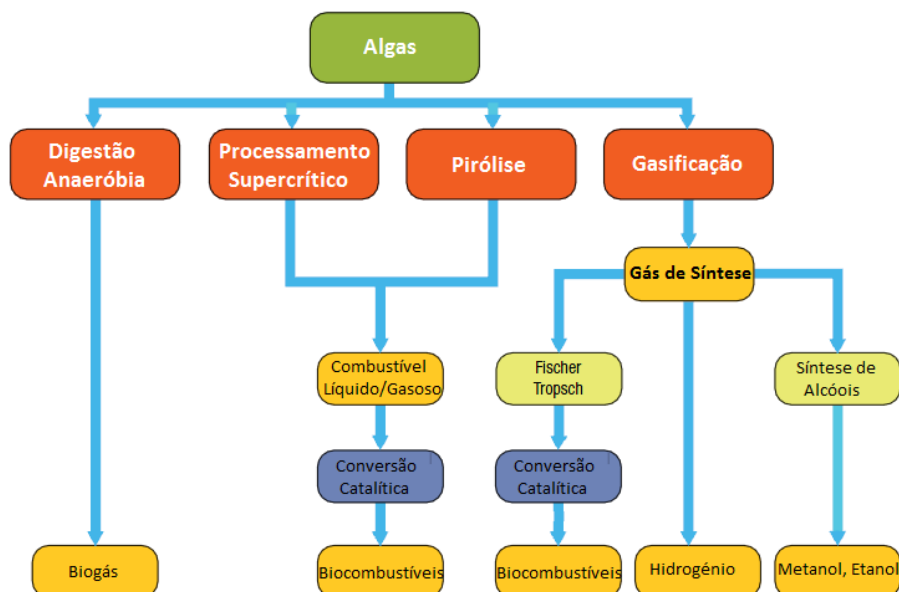


Figura 3.12 - Esquema das vias potenciais de conversão da alga inteira em biocombustíveis. (Fonte: adaptado de [24])

Biofotólise

Certas microalgas e cianobactérias são capazes de separar água em hidrogénio e oxigénio, usando luz como fonte de energia, no processo de biofotólise. Neste processo as algas estão naturalmente a produzir o combustível, onde a biofotólise directa é a forma mais simples de produção fotobiológica de hidrogénio. Este processo encontra-se em fase de desenvolvimento mas a produção de hidrogénio já foi demonstrada laboratorialmente [61].

O biocombustível produzido com algas não está a ser produzido actualmente á escala comercial devido aos custos de produção das tecnologias recentes. Inúmeros países construíram fábricas de escala de demonstração e escala piloto que produzem uma variedade de combustíveis em pequenas quantidades.

As companhias produtoras de biocombustível das algas prevêem uma produção entre 380 a 3 800 milhões de litros de biocombustível das algas até 2015. (existem relatos de apenas 230 milhões de litros até 2020 [61].

3.6. Implementação futura de biocombustíveis avançados

A IEA prevê que a instalação das primeiras fábricas de produção de biocombustíveis avançados em larga escala comercial ocorra na próxima década (2011), seguida de um rápido crescimento da produção de biocombustíveis avançados antes de 2020. Algumas das tecnologias inovadoras como a produção de biocombustíveis a partir das algas necessitam ainda de desenvolvimento, mas uma vez comercialmente estabelecidas irão satisfazer a procura prevista para 2030 [7].

A maioria das fábricas de produção de biocombustíveis avançados (piloto, de demonstração ou planeadas) são na UE e EUA, a capacidade total instalada de produção de biocombustíveis avançados em 2011 era de cerca de 175 milhões de litros de gasolina equivalente (lge) por ano, mas a maioria das fábricas está a operar abaixo da capacidade instalada. Estão em construção mais 1,9 mil milhões de lge por ano de capacidade de produção, que serão suficientes para satisfazer as metas definidas pelo cenário do *roadmap* da IEA até 2013 [7]. Foram anunciadas propostas para mais 6 mil milhões de litros de gasolina equivalente por ano

até 2015. As capacidades de produção do *roadmap* da IEA, actualmente instaladas, em construção ou planeadas até 2030 são demonstradas no gráfico da Figura 3..

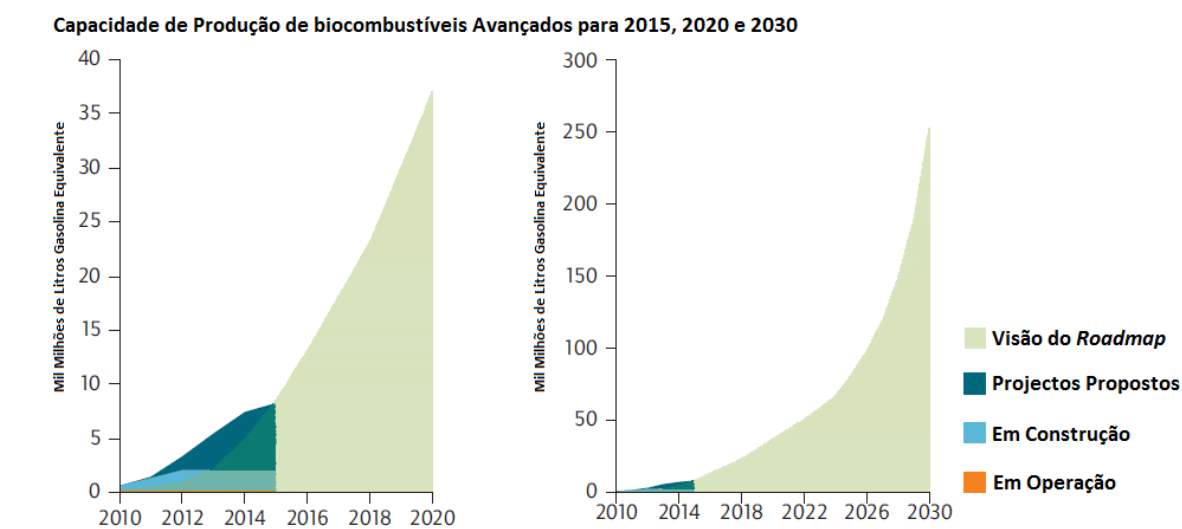


Figura 3.13 - Capacidade de produção de biocombustíveis avançados para 2015, 2020 e 2030 do roadmap da IEA. (Fonte: adaptado de [7])

Para alcançar as metas de redução definidas no roadmap da IEA, todas opções têm de ser analisadas em conjunto com a avaliação dos novos desenvolvimentos tecnológicos, tal como a produção de combustíveis de baixo-carbono combinados com a captura e sequestro de carbono [7]. Vários cenários já foram efectuados em relação á implementação de biocombustíveis até 2050, na tabela da Figura 3..

Percentagem de Biocombustíveis no Sector dos Transportes em 2030. 2035 e 2050		
Cenário	2030– 2050	Ano
BP Energy Outlook 2030 (2012)		2030
IEA World Energy Outlook (2012) "New Policies"		2035
IEA World Energy Outlook (2012) "450"		2035
Greenpeace (2012) Energy [R]evolution		2030
Greenpeace (2012) Energy [R]evolution		2050
WWF (2011) Ecofys Energy Scenario		2050
GEA Global Energy Assessment (2012)		2050
IEA Energy Technology Perspectives (2012) "2DS"		2050
		% Biocombustíveis
		7%
		6%
		14%
		17%
		72%
		100%
		30%
		39%

Figura 3.14 - Percentagem de biocombustíveis no sector dos transportes em 2030, 2035 e 2050 de acordo com vários cenários efectuados. (Fonte: adaptado de [95])

4. Potencial de implementação dos biocombustíveis

O potencial de implementação dos biocombustíveis depende de variados factores, como, a disponibilidade de matéria-prima, os objectivos de redução da emissão de GEE, os custos associados à sua produção, as infra-estruturas necessárias para o seu fornecimento, questões associadas com a sustentabilidade da sua produção (p.ex. uso sustentável do solo), a maturidade das tecnologias existentes e muitas outras variáveis. Neste capítulo é feita uma análise sobre o potencial de disponibilidade das matérias-primas e em relação ao potencial de redução das emissões de GEE, tendo por base cenários efectuados por diversos estudos (p.ex. IEA e CE). A análise foi feita em relação a estes parâmetros pois a implementação dos biocombustíveis assenta muito na hipótese de reduzir a dependência do petróleo e na mitigação das alterações climáticas, que passa pela redução das emissões dos GEE. Apresenta-se ainda uma análise exploratória sobre o potencial para Portugal, com base em cenários gerados pelo modelo TIMES_PT.

No relatório efectuado pela REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st century*, [95]) é referido que os biocombustíveis poderão fornecer pelo menos de 25% a 35% dos combustíveis de transporte mundiais até 2050, ainda que existam preocupações baseadas na sustentabilidade e nas restrições ao nível dos recursos.

Companhias petrolíferas são relativamente optimistas acerca dos biocombustíveis e muitas estão a fazer investimentos ou prevêem investir na investigação e produção destes [95]. A IEA (2011) refere que se assume que os biocombustíveis avançados irão estar comercialmente disponíveis por volta de 2020, embora ainda não competitivos com os combustíveis convencionais. Em 2035, os biocombustíveis avançados poderão satisfazer 18% do total de produção de biocombustíveis. O “*Technology Roadmap*” para os biocombustíveis da IEA (2011) projecta demonstrações de produção á escala comercial de etanol celulósico, BtL diesel (FT Diesel), e bio-SNG em 2015. Depois de 2015, o *roadmap* prevê conceitos inovadores de biorefinarias e após 2020 a produção viável de biocombustíveis derivados de algas e novas vias de produção. Os custos de investimento para as fábricas de produção de biocombustíveis avançados ainda são consideravelmente altos, pelo que, para a implementação viável destes os custos têm de sofrer um decréscimo significativo. [95]

4.1. Contexto actual

A produção **global** de biocombustíveis cresceu de 18 mil milhões de litros no ano 2000 para mais de 100 mil milhões de litros no ano 2010, como ilustrado na Figura 4.1. Hoje em dia os biocombustíveis fornecem cerca de **3%** do sector dos transportes globalmente [7].

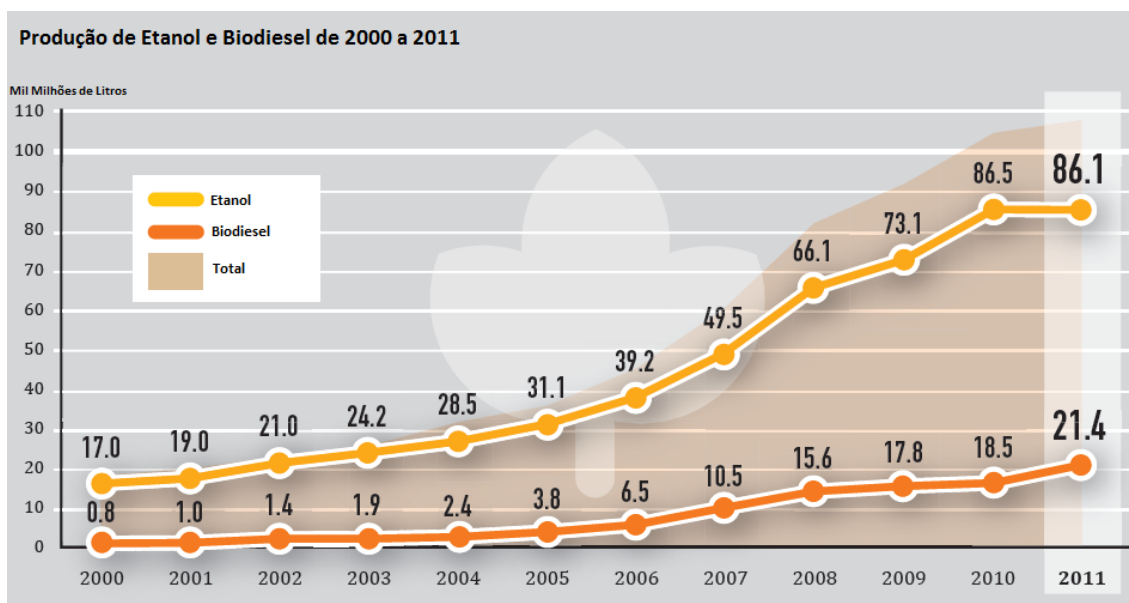


Figura 4.1 - Produção global de etanol e biodiesel de 2000 a 2011. (Fonte: adaptado de [47])

4.1.1. Biocombustíveis Convencionais na Europa

Os biocombustíveis de primeira geração já estão a ser produzidos em larga escala e verificou-se um grande aumento da sua produção na última década. Em 2008, 9,5 Mtep de biocombustíveis foram consumidos no sector dos transportes, que correspondem de 3,1% a 3,5% de todos os produtos petrolíferos consumidos neste sector (296 Mtep) e em 2007, o consumo de biocombustíveis foi de 2,2 % a 2,6%. Cerca de 72% destes biocombustíveis são biodiesel, 19% bioetanol e 9% os restantes biocombustíveis [46]. A evolução do consumo de biocombustíveis no consumo final de energia do sector dos transportes de 1990 a 2007 é apresentada na Figura 4.2, onde se observa a percentagem de biocombustíveis consumidos em relação aos combustíveis fósseis no sector dos transportes rodoviários

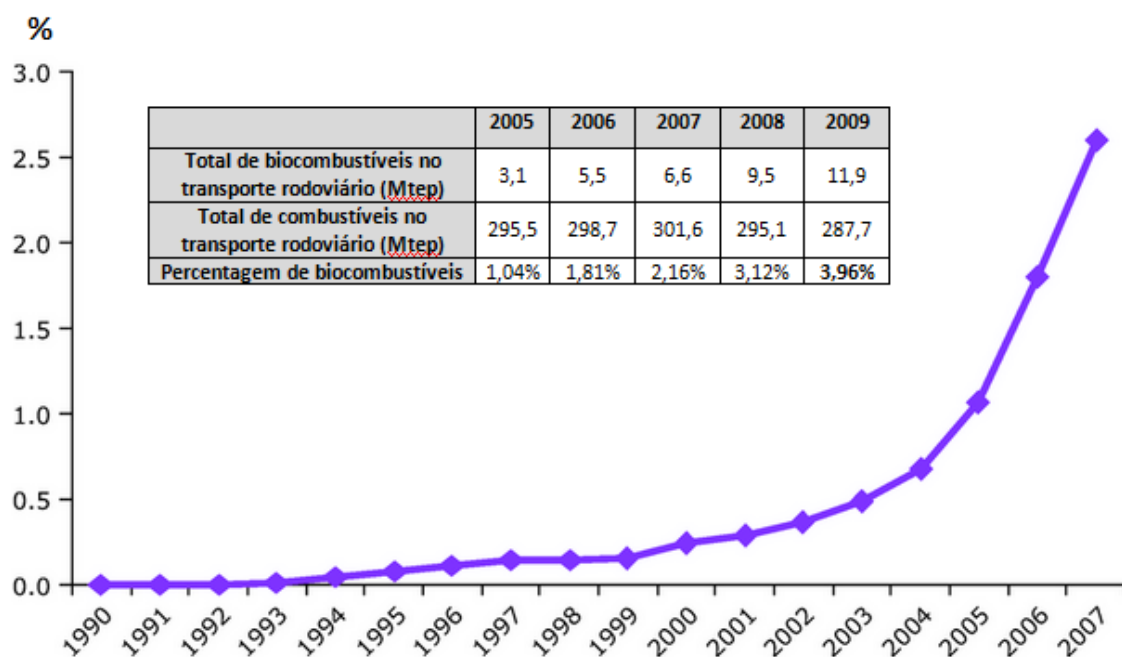


Figura 4.2 - Consumo final de biocombustíveis em % de energia final no sector dos transportes na UE-27. (Fonte: adaptado de [96];)

Cinco estados membros da UE, Alemanha, França, Reino Unido, Itália e Espanha, representam mais de 70% do mercado europeu de biocombustíveis, tanto em produção como em consumo. Cerca de 78% do biodiesel consumido na UE foi produzido na UE e 22% importado de outros países, maioritariamente os EUA [46].

A colza, ou couve-nabiça, foi a matéria-prima com maior importância para a produção de biodiesel na Europa, seguida de óleo de soja, óleo de palma e óleos de resíduos. Cerca de 58% destas matérias-primas são produzidas na UE [46]. O trigo, o milho e a beterraba sacarina foram as matérias-primas com maior importância para a produção de bioetanol produzido na UE, 65% do etanol consumido na UE foi também produzido na UE [46]. As importações de bioetanol em 2008 foram de 35%, sendo a maioria do Brasil, cuja produção foi maioritariamente feita com a cana-de-açúcar [46]. A maioria do biodiesel e bioetanol foram utilizados em misturas de baixa percentagem no diesel e na gasolina, respectivamente. As misturas de elevada percentagem de biodiesel, variam de 20 a 100% e são maioritariamente utilizadas na Alemanha [46].

4.1.2. Biocombustíveis Avançados na Europa

Investimentos significativos têm sido feitos na investigação e desenvolvimento dos biocombustíveis avançados na UE, nos EUA e noutros países da OCDE e algumas companhias estão a começar a sua produção à escala comercial ou anunciaram o seu começo para os próximos anos [97]. Mesmo com estes investimentos, ainda existem dúvidas sobre quando os biocombustíveis avançados serão comercialmente competitivos [97]. As iniciativas para a produção de biocombustíveis avançados na Europa estão limitadas a um pequeno número de Estados Membros e estão focadas num grande leque de tecnologias de conversão. A quantidade de biocombustíveis avançados produzidos em 2008 foi negligenciável [97]. No gráfico da Figura 4.3 é apresentada a capacidade de produção de biocombustíveis avançados em 2008 e planeada para 2009. Estão a ser desenvolvidos muitos projectos relacionados com os biocombustíveis avançados, desde investigações em Universidades á construção de fábricas de pequena escala.

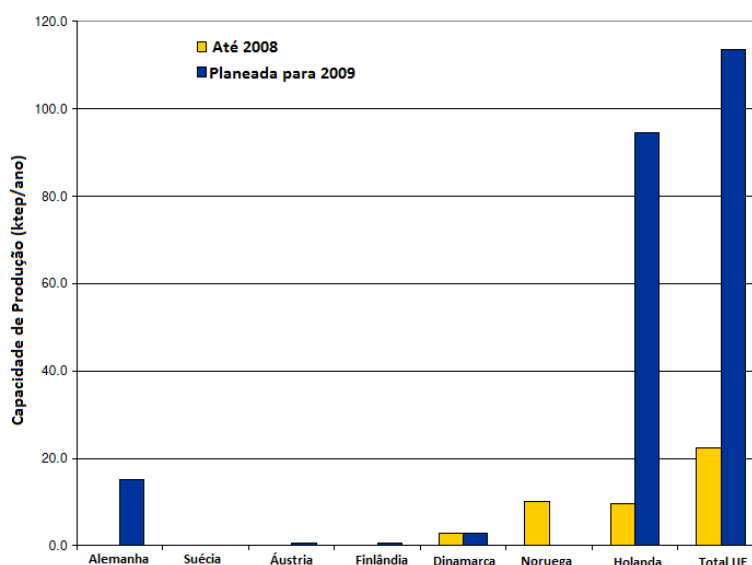


Figura 4.3 - Capacidade de produção de biocombustíveis avançados na Europa até 2008 e a capacidade de produção adicional planeada para 2009. (Fonte: adaptado de [46])

A maior produtora de biocombustíveis avançados da Europa, a companhia holandesa, **Bio-MCN**, desenvolveu um processo inovador de larga escala comercial que converte glicerina não refinada em metanol, através do gás de síntese. Este processo pode operar com biomassa gasificada e em Março de 2008, uma fábrica piloto começou a produzir 20,000 toneladas de biometanol por ano. No final de 2009, a Bio-MCN construiu a primeira unidade de produção

em larga escala de 200,000 toneladas de biometanol por ano. A produção de biometanol actual pela BIO-MCN não foi divulgada, em 2011 foi completada a certificação. [46]

A companhia norueguesa, **Borregaard Chemcell**, tem uma produção de 15 800 toneladas de bioetanol que utilize madeira como matéria-prima. [46]

Na Dinamarca muitas iniciativas de produção de biocombustíveis de materiais celulósicos são lideradas pela companhia **Inbicon**. Em 2009 foi construída uma fábrica de demonstração que produz etanol de palhas (resíduos agrícolas) com uma capacidade de 4 300 toneladas por ano. Também na Dinamarca o grupo **Bionic Fuel Technologies** tem uma tecnologia de conversão de biomassa em óleos leves e desde 2008 produz 200 toneladas por ano de biodiesel de resíduos agrícolas. [46]

O grupo **Sekab**, o maior produtor sueco de etanol, é um dos líderes do desenvolvimento de tecnologias de produção de etanol a partir de matéria-prima celulósica. A fábrica piloto tem estado em operação continua desde 2004 produzindo 100 toneladas de etanol por ano a partir de resíduos florestais. [46]

A companhia alemã **Choren Industries** iniciou, em Abril de 2008, a primeira fábrica de biomassa para líquidos (BtL) que opera baseada na gasificação e síntese Fischer-Tropsch para produção de biocombustíveis. No final de 2009 a fábrica produzia 15 000 toneladas por ano de FT-diesel a partir resíduos de madeira. Está planeada uma fábrica de larga escala industrial com uma produção de 200 000 toneladas de biocombustível por ano para começar a operação em 2013-2014. [46]

Uma operação conjunta entre a **Neste Oil** e a **Stora Enso**, a **NSE Biofuels Oy**, construiu uma fábrica de demonstração na Finlândia com uma produção anual de 656 toneladas por ano de FT-diesel, que utiliza a gasificação de resíduos florestais em gás de síntese. [46]

Na Áustria, a companhia **CTU**, demonstrou a produção de SNG através da conversão termoquímica de biomassa sólida. A fábrica de demonstração foi inaugurada em Junho de 2009 com uma produção anual de 576 toneladas de SNG. [46]

A companhia espanhola **Abengoa** tem uma fábrica de demonstração que começou a a produção de etanol celulósico em 2009 a partir de palha de milho, com uma produção de 70 toneladas por dia. [46]

A maior fábrica á escala de demonstração de produção de etanol celulósico na Alemanha está a ser construída, desde 2012, que produzirá de 1 000 a 2 000 toneladas de bioetanol (etanol celulósico). As fábricas á escala comercial no futuro terão uma capacidade de produção de 50,000 a 150,000 toneladas de bioetanol por ano. [98]

Na Finlândia, a **Neste Oil** desenvolveu um processo de hidrogenação para produzir óleos vegetais tratados a hidrogénio (HVO) com o nome de NExBTL. Em 2009 uma segunda fábrica foi construída com a capacidade de produzir 190,000 toneladas de NExBTL por ano. [46]

4.1.3. Biocombustíveis Convencionais/1ª geração em Portugal

A produção de biocombustíveis em Portugal está limitada á produção de biodiesel. Os cinco maiores produtores de biodiesel de 1ª geração são a IBEROL, a Torrejana, a PRIO-biocombustíveis, a biovegetal e a Tagol. No mapa da figura estão representados os principais produtores de biodiesel em Portugal no ano 2010. A capacidade de produção dos principais produtores é de aproximadamente 500 mil toneladas de biodiesel (18,6 PJ), que utilizam cerca de 99% de óleo ou sementes importados, de colza, soja ou palma [42].



Figura 4.4- Principais produtores de biodiesel em Portugal em 2010. (Fonte: adaptado de [42])

4.1.4. Biocombustíveis Avançados em Portugal

Em Portugal a produção de biocombustíveis avançados é inexistente ou reduzida, apenas existem alguns projectos planeados. A companhia Galp Energia em conjunto com a Adene vai iniciar um projecto de produção de biocombustíveis avançados a partir de óleo de jatropha que é cultivado em Moçambique. O projecto é feito em parceria com a Universidade de Évora, Instituto Superior de Agronomia e o instituto Politécnico de Portalegre e vale cerca de 2 milhões de euros (Fev. 2012) [99]

A BLC 3, plataforma Plataforma para o Desenvolvimento da Região Interior Centro, em colaboração com o LNEG, apresentou em Fevereiro de 2012, o BioREFINA-TER, um projecto inovador na produção de substitutos dos combustíveis fósseis com a transformação de resíduos lenho-celulósicos florestais em biocombustíveis lenho-celulósicos, que foi considerado pela UE como “relevante” numa candidatura a um fundo europeu no valor de 118 milhões de euros. Este projecto já recebeu apoios para a construção de uma biorefinaria que produzirá cerca de 25 milhões de litros de biocombustível avançado e poderá representar para Portugal uma economia anual nas importações de petróleo de 1 bilião e 500 milhões de euros [100]; [101]

Nos Açores, a Algicel, uma empresa de biotecnologia investiu 4,2 milhões de euros para a produção de microalgas (Jan 2013) [102].

4.2. Potencial de disponibilidade de matéria-prima para produção de biocombustíveis

O potencial de substituição dos biocombustíveis avançados depende de muitos factores, tais como, a disponibilidade da matéria-prima, o nível de redução de emissões de GEE e os custos associados á sua produção. Nesta secção é feita uma análise do potencial de cada tipo de matéria-prima com base em vários estudos efectuados, a análise de cada tipo de matéria-prima serve como referência para se conseguir entender o potencial geral, podendo haver diversas variações nos valores do potencial de disponibilidade de matéria-prima, consoante o estudo elaborado.

4.2.1. Potencial global de biomassa disponível para produção de biocombustíveis avançados em 2050

O IPCC efectuou um estudo sobre o potencial **global** da biomassa para produção de energia em 2050 em que estima que o potencial pode ultrapassar os **500 EJ** por ano [16]. O estudo assume quadros políticos que asseguram um uso do solo sustentável e têm em conta as limitações de água, protecção da biodiversidade, degradação do solo e competição com o alimento. O estudo estima que o potencial dos resíduos florestais, agrícolas e orgânicos (parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos, estrume animal, resíduos de processos industriais, etc) pode ser dos **50 EJ** aos **1000 EJ** por ano (uma média de 500 EJ por ano) [16], os maiores potenciais são para cenários óptimos, pelo que é pouco provável virem a verificar-se. Na Tabela 4.1 são apresentados os potenciais das diferentes categorias de biomassa do estudo do IPCC.

Tabela 4.1 - Potencial global de biomassa disponível em 2050 das diferentes categorias. (Fonte: adaptado de [16])

Categoria	Descrição	Potencial 2050 (EJ/ano)
Resíduos Agrícolas	Os sub-produtos associados á produção agrícolas pós processamento (p.ex palhas e cascas)	15 -70
Culturas energéticas em áreas agrícolas excedentes	Culturas agrícolas convencionais e culturas dedicadamente energéticas, incluindo culturas para óleos, gramíneas lenho-celulósicas, culturas de rotação curta e árvores. Apenas áreas não necessárias para a produção de alimento são consideradas para a produção de bioenergia. O maior potencial, de 700 EJ/ano, necessita de um desenvolvimento global que objective grandes produções agrícolas de alto rendimento e baixas necessidades de áreas para pastoreio. O potencial de “zero” reflecte o grande desenvolvimento do sector agrícola de tal forma que não estejam disponíveis áreas excedentes.	0 - 700

Culturas energéticas em áreas não aptas para produção agrícola	Produção de biomassa em solo degradado e esgotado, não apto para agricultura convencional mas apto para culturas energéticas. Os maiores potenciais desta categoria assumem que ocorrerá uma área de produção de biomassa que excede a área de cultivo global actual. O potencial de “zero” reflecte o baixo potencial desta categoria devido a requisitos de solo para, por exemplo, pastoreio ou o baixo desempenho económico no uso deste solo para bioenergia.	0-110
Resíduos florestais	Resíduos e subprodutos do sector florestal que incluem resíduos do desbaste e corte de árvores, biomassa florestal não utilizada para a indústria de madeira, etc. O potencial de “zero” indica que a procura desta biomassa por outros sectores pode ser superior á da capacidade florestal.	0 -110
Resíduos orgânicos	Resíduos orgânicos de habitações e restaurantes, produtos de madeira descartados, como papel, madeira de construção e de demolições. A disponibilidade depende de outros uso para esta biomassa e da implementação de sistemas de recolha	5 - >50
Total		<50 - >1000

4.2.2. Potencial de disponibilidade de licores negros

Mundialmente a indústria da pasta de papel processa actualmente cerca de 190 milhões de toneladas de licores negros por ano, com um conteúdo energético total de cerca de **2 EJ**, o que torna os licores negros uma fonte de matéria-prima significativa [29]. Em relação ao potencial de produção de biocombustíveis, para toda a UE é possível a produção cerca de **220 PJ** de biocombustíveis por ano, a partir de licores negros (estes valores foram calculados para a produção de biometanol) [29]. Comparando este valor com o actual consumo total de combustíveis no sector dos transportes e com um máximo de substituição calculado para cada país, a Finlândia conseguiria substituir mais de 50% do total de combustíveis consumidos, a Suécia e Portugal cerca de 30% e 10 %, respectivamente [29]. A produção de licores negros em Portugal em 2001 era cerca de **33,2 PJ** anuais [29].

4.2.3. Potencial de disponibilidade da biomassa geral

O potencial de biomassa disponível é um factor com bastante relevância pois a redução da dependência do petróleo está directamente relacionada com a quantidade de biomassa disponível para a produção de biocombustíveis substitutos dos combustíveis fósseis. Em 2005, o potencial de biomassa disponível para produção de biocombustíveis na Europa, sem afectar a indústria alimentar, de isolamento e têxtil era de aproximadamente 4 EJ (95Mtep) por ano. Em 2020 o potencial será entre 4,7 EJ/ano (112 Mtep) e 7,2 EJ/ano (172 Mtep), dependendo do desenvolvimento agrícola de produção extensiva ou intensiva, respectivamente [70]. O potencial de biomassa disponível com maior potencial pode ser dividido em três categorias: as culturas energéticas, os resíduos agrícolas e os resíduos florestais, que se apresentam a seguir [103].

Culturas dedicadamente energéticas

O potencial na UE para culturas dedicadamente energéticas, como o salgueiro, o álamo e o eucalipto, é de **7,2 EJ** por ano em 2020 e de **9,5 EJ** por ano em 2030. Para as culturas de gramíneas, como a eulalia, a gramínea "*Panicum virgatum*" e o caniço-malhado, o potencial é de **9,3 EJ** por ano em 2020 e de **12,2 EJ** por ano em 2030 [103]. Os custos de produção para estes dois tipos de cultura na Europa em 2030 são demonstrados no gráfico da Figura 4.5 e vão até custos reduzidos de **11 USD** por GJ quando comparados com os custos das matérias-primas de primeira geração que vão de 15 USD a mais de 25 USD por GJ [103].

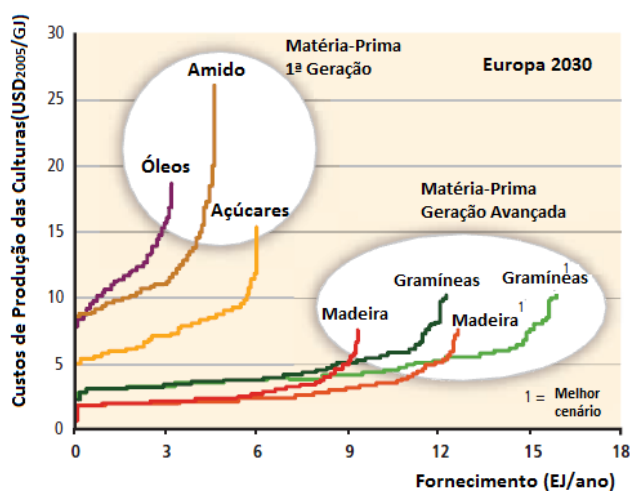


Figura 4.5 - Custos de produção das matérias-primas de 1ª geração e de geração avançada na Europa em 2030. (Fonte: adaptado de [103])

No mapa da Figura 4.6 está representada a percentagem de área disponível para culturas dedicadamente energéticas na Europa em 2030, onde se observa que Portugal apresenta das maiores percentagens de área disponível para cultivo de culturas energéticas com percentagens de **17%** a **31%** de área disponível para culturas dedicadamente energéticas em todo o território.

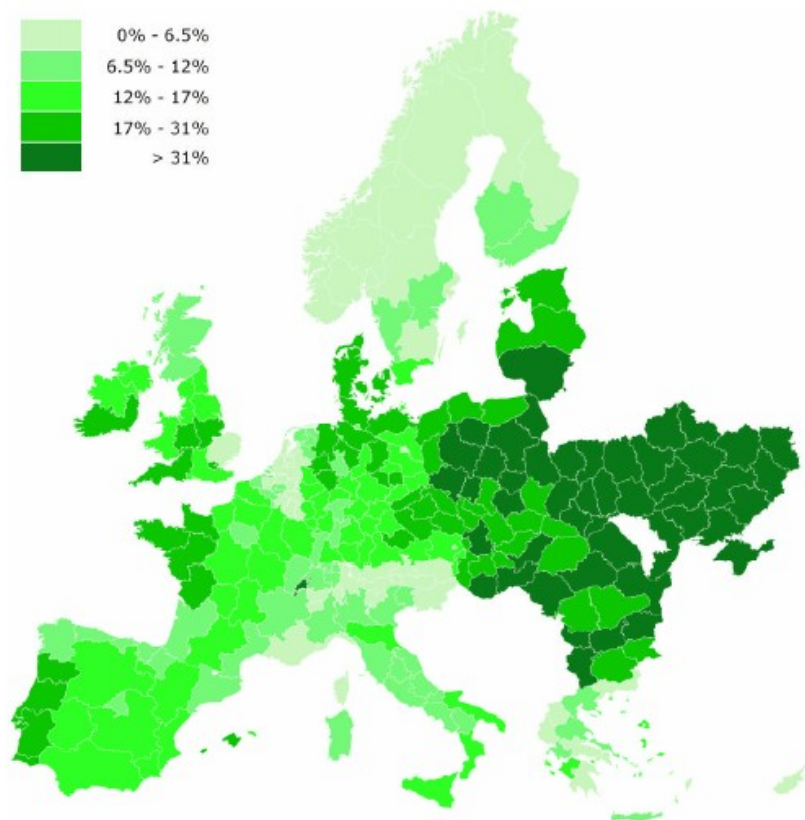


Figura 4.6 - Área potencialmente disponível para produção de culturas dedicadamente energéticas na Europa em 2030. (Fonte: adaptado de [103])

No mapa da Figura 4.7 estão representados os custos de produção de culturas de madeira (eucalipto, álamo e salgueiro) para produção energética na Europa em 2005 em €₂₀₀₅/GJ, onde se repara que Portugal apresenta dos custos mais reduzidos de produção, com valores de **1,24€** a **2,45€** por GJ produzido.

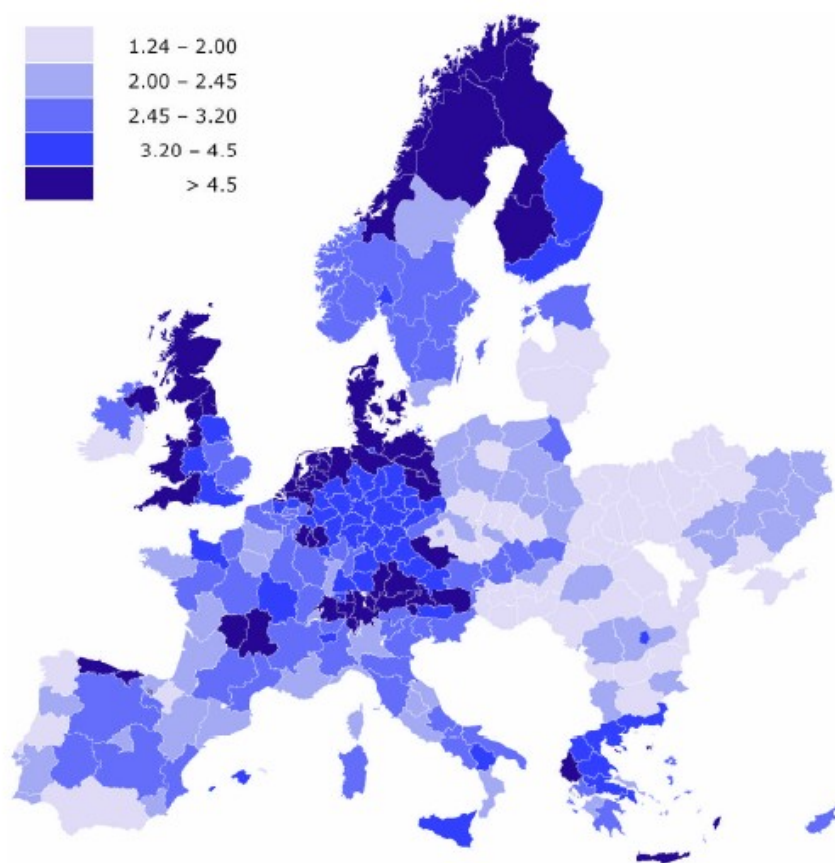


Figura 4.7 - Distribuição espacial dos custos de produção de culturas de madeira dedicadamente energéticas na Europa em 2005 (€2005/GJ). (Fonte: adaptado de [103]).

Resíduos agrícolas e florestais

Os resíduos agrícolas da UE têm um potencial de disponibilidade de **3,5 EJ** em 2020 e de **3,1 EJ** em 2030 (os potenciais biomassa disponível diminuem de 2020 para 2030 porque são projectadas menos quantidades de fornecimentos agrícolas para 2030) [103]. Os custos de produção variam de 1 a 6,5 euros por GJ [103]. O potencial dos resíduos florestais na UE é de **2,7 EJ** por ano em 2030 [103]. O potencial de biomassa total disponível é o conjunto das culturas dedicadamente energéticas, dos resíduos agrícolas e dos resíduos florestais [103]. O potencial de biomassa total anual disponível na Europa (UE-27, a Noruega, a Suíça e a Ucrânia) é estimado em 16,5 EJ por ano [103], isto representa cerca de 400 Mtep. [70]

Nos mapas da Figura 4.8 é apresentado o potencial de biomassa disponível na UE (culturas energéticas e resíduos agrícolas) para produção de biocombustíveis avançados em 2020 com impactos mínimos noutros sectores e a nível ambiental, no Sul de Portugal verifica-se um

grande número de áreas de solo que pode ser utilizado para bioenergia, com um potencial de biomassa disponível de **18 a 28 GJ/ha** por ano para culturas energéticas e de **2 a 4 GJ/ha** por ano para resíduos agrícolas. No Norte de Portugal os potenciais são mais reduzidos.

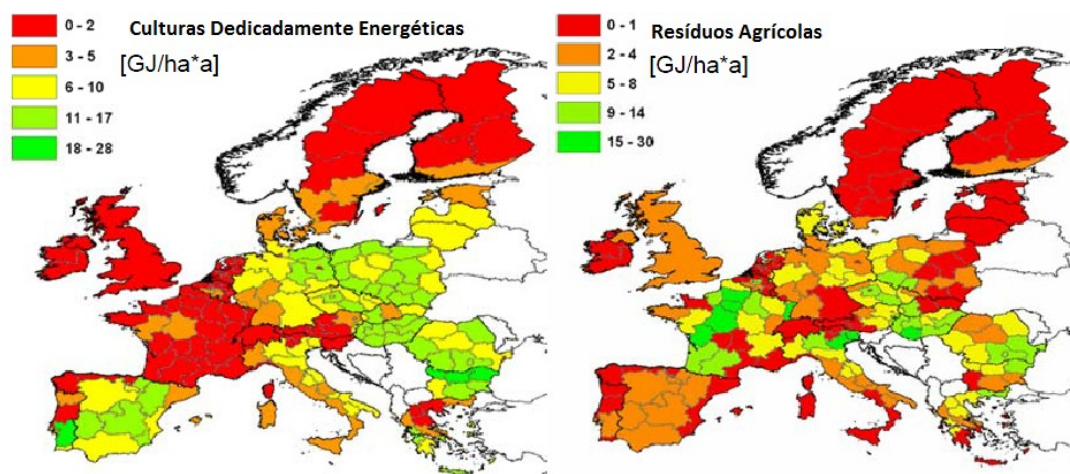


Figura 4.8 - Potencial de disponibilidade de biomassa (culturas energéticas e de resíduos agrícolas) na Europa em 2020 (GJ/(ha*ano). (Fonte: adaptado de [70])

No cálculo do potencial de biomassa disponível para a criação dos mapas assume-se que para resíduos agrícolas, as palhas usadas para a indústria pecuária não são afectadas, e para as culturas energéticas, as áreas de cultivo não interferem com a indústria alimentar. O potencial foi calculado em toneladas de matéria seca e os poderes caloríficos utilizados foram de 13,1 GJ/t para as palhas de cereais, de 18,8 GJ/t para o salgueiro e outras culturas energéticas e de 8,0 GJ/t para os resíduos florestais [70]. Na Tabela 4.2 estão os valores do potencial teórico máximo de biomassa florestal, de resíduos agrícolas e da indústria de transformação da madeira do estudo “ Roteiro Nacional de Baixo Carbono”, onde os valores teóricos máximos do total de biomassa em 2050 em Portugal perfazem **36,8 PJ** anuais [104].

Tabela 4.2 - Potencial teórico máximo de biomassa em 2020, 2030 e 2050 em Portugal. (Fonte: adaptado de [104]).

Recurso	Unidade	2020	2030	2050	Fonte
Biomassa Florestal	PJ	17,67	30,87		Grupo de trabalho-Direcção Nacional das Fileiras Florestais, Junho, 2010. Comunicação pessoal de Armando Góis. CELPA.
Biomassa (resíduos agrícolas + indústria transformação da madeira)		5,93		INR, 2006.PERAGRI - Plano Estratégico dos Resíduos Agrícolas. Relatório Técnico, Vol 1 - Sumário Executivo. Abril de 2006. Universidade do Minho GPPAA- MADRP. 2005. Biomassa e Energias Renováveis na Agricultura Pesca e Florestas.	

4.2.4. Potencial de disponibilidade de resíduos sólidos urbanos em Portugal

O Roteiro Nacional de Baixo Carbono considera um potencial de RSU para produção de energia de **10,43 PJ** anuais em 2050, como apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Potencial teórico máximo de RSU em 2020, 2030 e 2050 em Portugal. (Fonte: adaptado de 132)

Recurso	Unidade	2020	2030	2050	Fonte
RSU	PJ	9,83	9,99	10,43	Extrapolação com base em indicador de RSU incinerado per capita e cenários de RSU elaborados no âmbito do PORTUGAL CLIMA2020

4.3. Potencial dos biocombustíveis para a redução de emissões de GEE

A IEA (2011) efectuou um estudo sobre o potencial de redução de emissões de GEE através da utilização de biocombustíveis, com base em vários cenários. O cenário “ETP 2010 BLUEMap” definiu uma meta de 50% de redução de emissões de CO₂ de fonte energéticas no período de 2005 a 2050 [7]. Esta meta exige o desenvolvimento e implementação de medidas e tecnologias de baixo-carbono, como a melhoria de eficiência energética, maior uso de fontes de energia renovável e implementação de tecnologias de captura e sequestro de carbono [7]. Para alcançar a redução de emissões prevista no sector dos transportes, este cenário prevê que a produção sustentável de biocombustíveis (biocombustíveis avançados) fornecerá **27%** do combustível total nos transportes em 2050 e a procura de biocombustíveis em 2050 alcançará os **32 EJ**, ou 760 Mtep [7]. À medida que os biocombustíveis avançados serão comercializados, espera-se que estes forneçam a maior parte de biocombustíveis, visto que se espera que os biocombustíveis de primeira geração deixem de ser fabricados devido aos preços crescentes e voláteis das suas matérias-primas, à base de açúcares e amido. Os substitutos do diesel irão desempenhar um papel importante na descarbonização dos transportes pesados, visto estes terem poucas alternativas de combustíveis de baixo-carbono. O transporte rodoviário de passageiros constituirá 37% do consumo de biocombustíveis no sector dos transportes [7]. Nos gráficos da Figura 4.9 apresenta-se o uso global de energia no sector dos transportes e a utilização dos biocombustíveis nos diferentes meios de transporte em 2050 para o cenário “BLUE Map” da IEA.

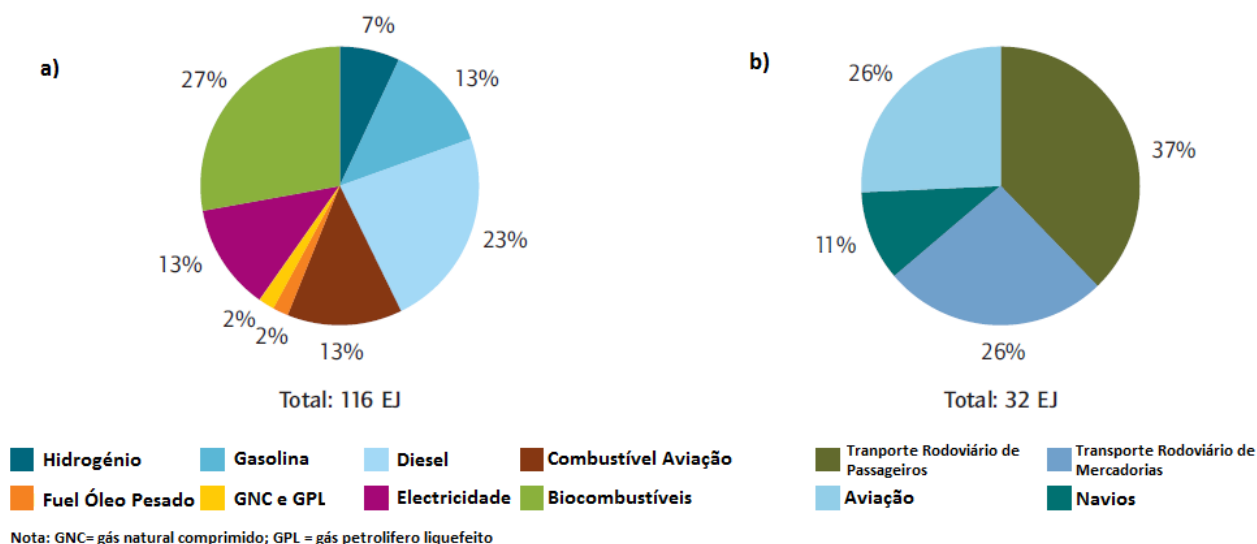


Figura 4.9 - Uso de energia global no sector dos transportes (a) e uso dos biocombustíveis nos diferentes meios de transporte (b) em 2050 (cenário BLUEMap da IEA). (Fonte: adaptado de [7])

As reduções das emissões do sector dos transportes irão contribuir consideravelmente para as metas definidas no cenário do estudo da IEA, com cerca de 23% de redução até 2050 [7]. As maiores reduções serão alcançadas nos países da OCDE. A eficiência dos veículos representará um terço das reduções das emissões no sector dos transportes e a utilização de biocombustíveis é a segunda maior contribuição. A contribuição dos biocombustíveis na redução das emissões de GEE é mostrada na Figura 4.10.

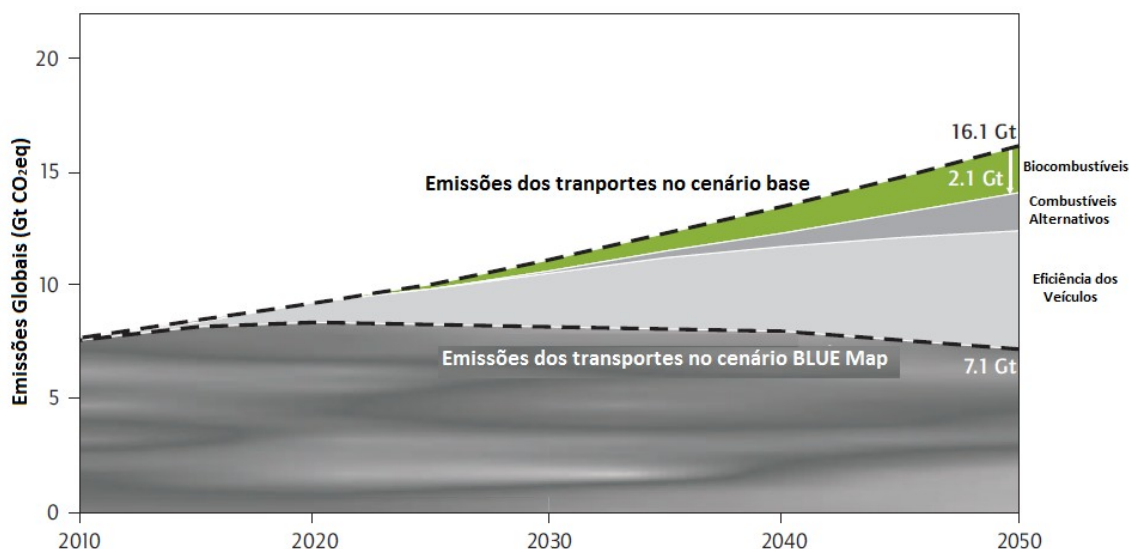


Figura 4.10 - Contribuição dos biocombustíveis para a redução das emissões de GEE do sector dos transportes de 2010 a 2050. (Fontes: adaptado de [7])

4.4. Potencial para Portugal

O parque automóvel em Portugal é maioritariamente composto por veículos movidos a gasóleo, pelo que será de esperar que na criação dos cenários, os biocombustíveis substitutos do gasóleo sejam os que tenham maior potencial de penetração. No gráfico da Figura 4.11 está representado o parque de veículos motorizados por tipo de combustível utilizado em Portugal em 2011, onde se observa que o combustível maioritário é o gasóleo (valores do INE).

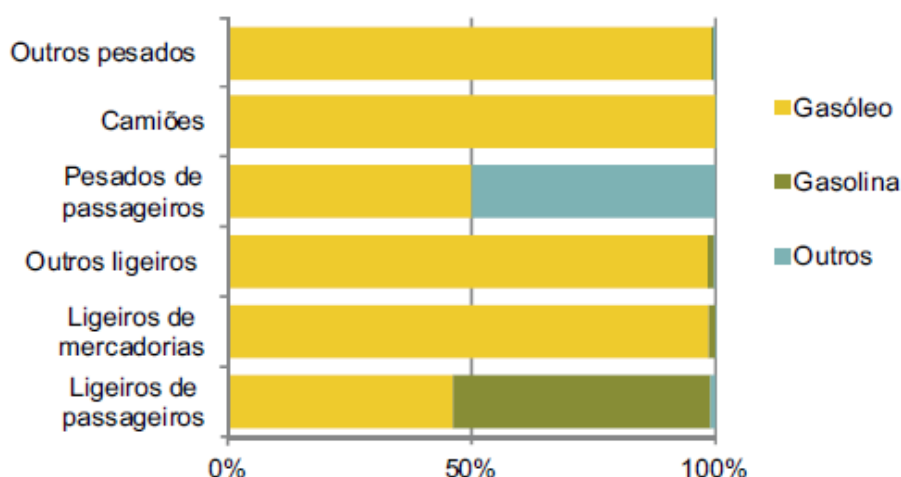


Figura 4.11 - Parque de veículos motorizados por tipo de combustível utilizado em Portugal em 2011. (Fonte: adaptado de [105])

Nesta secção é feita uma análise exploratória de cenários prospectivos para o sistema energético português gerados pelo modelo TIMES_PT em relação á implementação dos biocombustíveis avançados em Portugal, onde foram definidos dois cenários: i) o cenário “base_GEE”, cenário base, com tecto de 70% de redução de emissões de GEE em 2050 face ao nível de emissões em 1990; ii) o cenário “biof_GEE”, cenário com tecto de 70% de redução de emissões GEE em 2050 e com a limitação de importação de biocombustíveis finais, i.e. biodiesel e bioetanol; neste cenário o modelo TIMES_PT inclui na sua base de dados as tecnologias de produção de biocombustíveis avançados consideradas nesta dissertação, em particular as características tecno-económicas.

O exercício de modelação com o cenário “biof_GEE” tem por objectivo analisar a competitividade esperada até 2050 destas tecnologias face ás tecnologias designadas como de 1ª geração.

O cenário biof_GEE projecta uma diminuição do consumo final de energia no sector dos transportes de 265,4 PJ em 2010 para 179,2 PJ em 2050. Uma explicação para esta diminuição do consumo de energia é o aumento da eficiência das tecnologia automóvel. No gráfico da Figura 4.12 é apresentado o consumo de energia final por sector em PJ para o cenário biof_GEE em Portugal de 2010 a 2050, em que se verifica uma redução da participação dos transportes no consumo total.

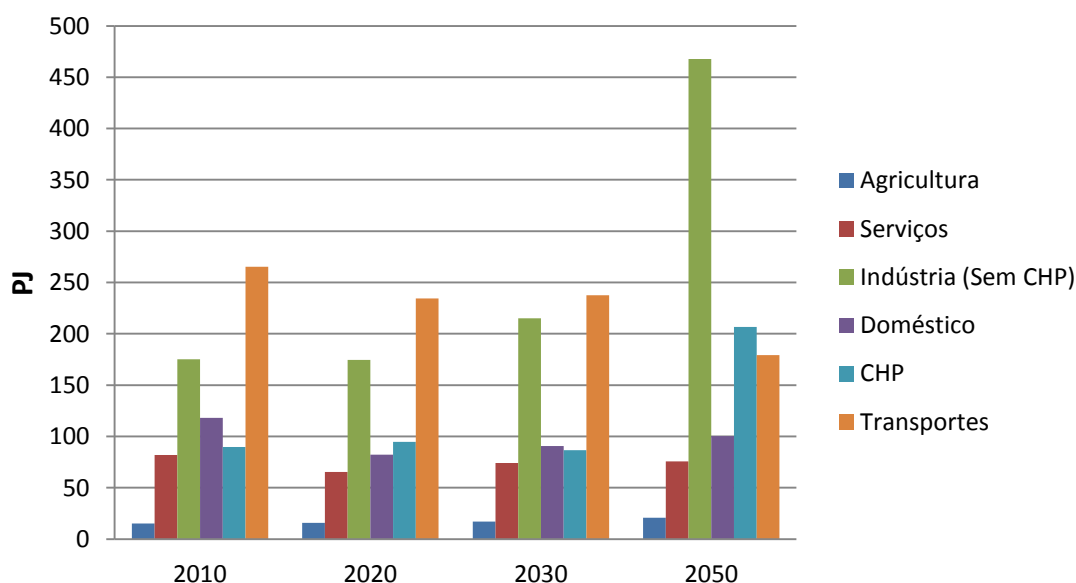


Figura 4.12 - Consumo de energia final por sector para o cenário biof_GEE em Portugal de 2010 a 2050 (PJ).

O cenário biof_GEE projecta um **aumento** do consumo de biomassa endógena de 27,75 PJ em 2020 para 64,06 PJ em 2050, e as importações de petróleo bruto projectadas pelo modelo **diminuem** de 536,66 PJ em 2010 para 163,70 PJ em 2050. Este factor pode ser considerado bastante positivo pois o aumento do consumo de biomassa endógena (para produção de biocombustíveis) em paralelo com a diminuição das importações de petróleo bruto, indica um uso de biomassa endógena para a produção de biocombustíveis e consequentemente uma diminuição da dependência do petróleo. No gráfico da Figura 4.13 está apresentado o consumo de recursos endógenos em PJ no cenário biof_GEE para Portugal em 2050 e no gráfico da Figura 4.14 apresenta-se a importação de petróleo bruto em PJ no cenário biof_GEE para Portugal em 2050.

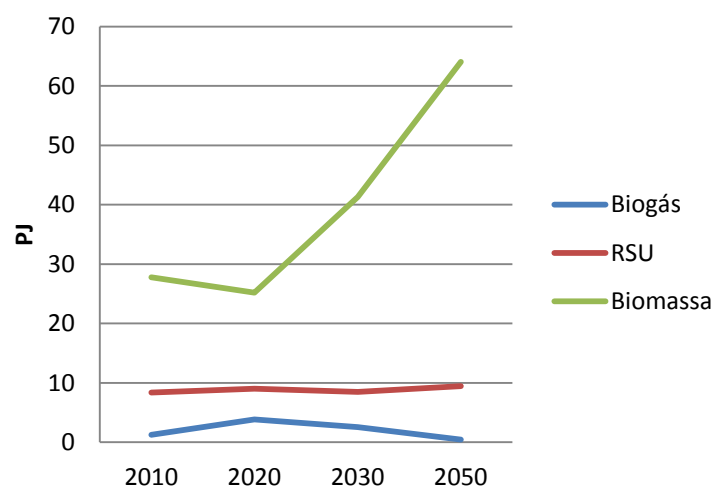


Figura 4.13 - Consumo de recursos endógenos no cenário biof_GEE em Portugal de 2010 a 2050 (PJ).

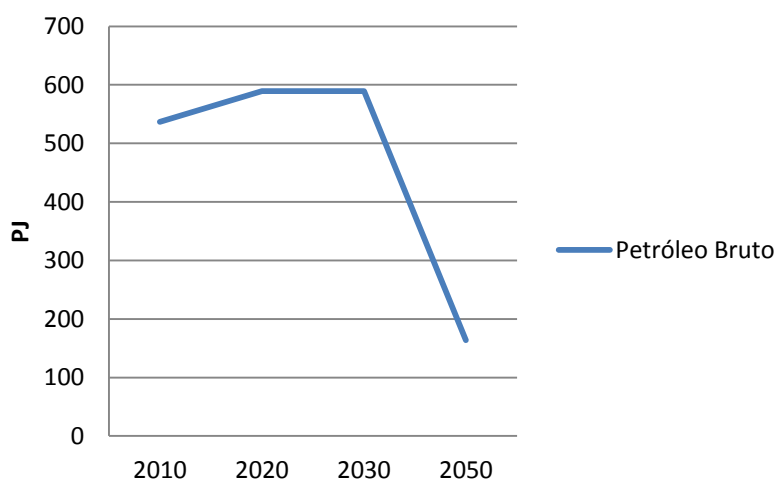


Figura 4.14 - Importação de petróleo bruto em PJ no cenário biof_GEE para Portugal em 2050.

O modelo TIMES_PT na criação dos cenários fez uma projecção do consumo de energia final no sector dos transportes subdividido por tipo de combustível. No cenário biof_GEE, com a inclusão na base de dados dos parâmetros tecno-económicos das tecnologias de produção de biocombustíveis avançadas analisadas nesta dissertação, o modelo seleccionou 4 tecnologias: i) gasificação dos licores negros para a produção de metano, ii) a gasificação de resíduos urbanos para a produção de FT-diesel, iii) a gasificação de biomassa para a produção de FT-diesel e iv) a gasificação de biomassa para a produção de etanol. Estas tecnologias estão representadas da Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Tecnologias seleccionadas pelo TIMES_PT na criação do cenário “biof_GEE” de 2015 a 2050 e respectiva produção de biocombustível e consumo.

Tecnologia	Atributo	2015	2020	2030	2050
Gasificação de licores negros para produção de metano	Capacidade instalada (GW)	0,00	0,00	0,02	2,50
	Consumo (PJ) Licor Negro	0,00	0,00	0,00	69,20
	Produção (PJ) Biogás (CH ₄)*	0,00	0,00	0,00	72,08
	Calor (ind. Pasta e papel)	0,00	0,00	0,00	14,42
Gasificação de RSU para produção de FT-Diesel	Capacidade instalada (GW)	0,00	0,00	0,00	0,01
	Consumo (PJ) RSU	0,00	0,00	0,25	0,31
	Produção (PJ) Bio FT-Diesel	0,00	0,00	0,14	0,18
	Calor (ind. Pasta e papel)	0,00	0,00	0,03	0,04
	Naphta	0,00	0,00	0,02	0,02
Gasificação de biomassa para produção de FT-Diesel	Capacidade instalada (GW)	0,00	0,13	0,38	2,84
	Consumo (PJ) Biomassa	0,00	6,19	18,13	133,98
	Produção (PJ) Bio FT-Diesel	0,00	3,77	11,05	81,70
	Calor (ind. Pasta e papel)	0,00	0,75	2,21	16,34
	Naphta	0,00	0,53	1,55	11,44
Gasificação de biomassa para produção de etanol	Capacidade instalada (GW)	0,02	0,02	0,02	0,00
	Consumo (PJ) Biomassa	1,02	1,02	1,02	0,00
	Produção (PJ) Bioetanol	0,54	0,54	0,54	0,00
	Electricidade	0,03	0,03	0,03	0,00
	Calor (ind. Pasta e papel)	0,11	0,11	0,11	0,00

*Na produção de biogás é utilizada biomassa adicional

As tecnologias de produção FT-diesel a partir de RSU e de produção de etanol a partir de biomassa, ao serem seleccionadas pelo modelo significa que são tecnologias custo-eficazes, ainda que a produção dos biocombustíveis seja negligenciável, a introdução de diferentes parâmetros e restrições pode resultar numa maior produção destes biocombustíveis.

O modelo projecta, no cenário “biof_GEE”, um aumento no consumo de FT-diesel de 2010 a 2050, um aumento no consumo de etanol em 2020 e 2030 e um aumento do consumo de biogás em 2050, este consumo de biogás, produzido com a tecnologia de geração avançada é feito no sector da indústria, o modelo considera mais vantajoso encaminhar este biogás para outro sector que não os transportes, pois no sector dos transportes existe uma grande variedade de recursos energéticos enquanto o sector industrial pode estar limitado em termos de recursos alternativos ao petróleo, relembra-se que este cenário considera uma redução muito significativa das emissões de GEE no período até 2050 No gráfico da Figura 4.15 é

apresentado o consumo de FT-diesel e de biodiesel (1ªG) para o sector dos transportes de 2010 a 2050 em cada um dos cenários, foram escolhidos estes gráficos específicos pois são os que apresentam as diferenças mais significativas entre os 2 cenários.

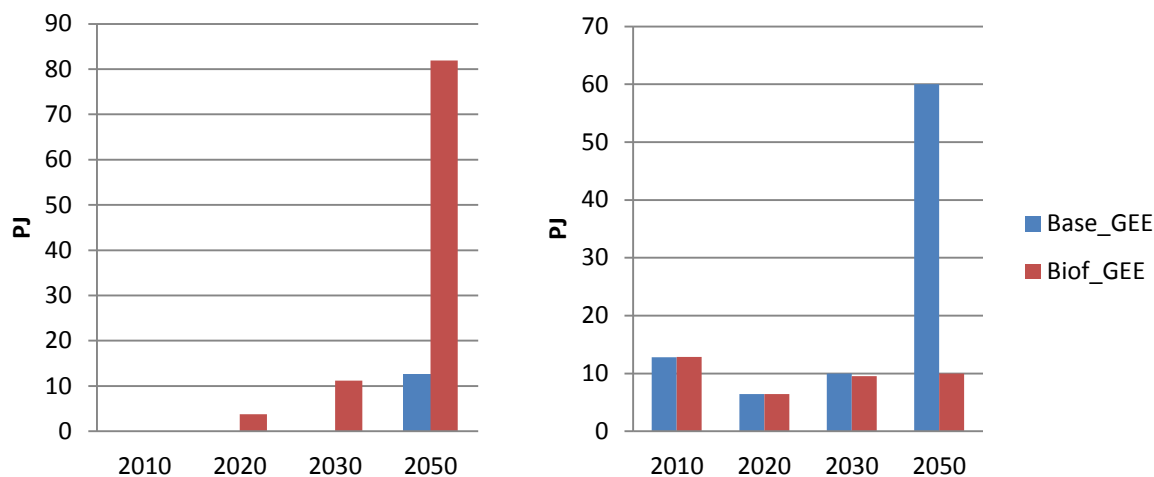


Figura 4.15 - Consumo de FT-diesel (esquerda) e de biodiesel (direita) de 2010 a 2050 em cada um dos cenários (PJ).

Nestes gráficos é possível observar o consumo crescente de **FT-diesel** com a implementação das novas tecnologias de produção de biocombustíveis avançados no cenário biof_GEE, e um consumo de **biodiesel de 1ª geração** inferior de 2010 a 2050 para o cenário biof_GEE comparativamente ao cenário base_GEE. Assim é possível induzir que a introdução desta tecnologia é mais custo-eficaz e com melhores desempenhos tecno-ambientais, comparativamente à de primeira geração, pois existe um consumo de FT-diesel em substituição ao consumo de biodiesel de 1ªG, a diferença no consumo de biodiesel de 1ª geração em 2050 entre os dois cenários é de **50 PJ**.

O consumo de gasóleo e gasolina (produzidos com petróleo) é negligenciável em **2050** para os dois cenários (3-4 PJ), o que indica uma substituição deste combustível por outros alternativos, como os biocombustíveis e electricidade. Nos gráficos das Figura 4.16 e da Figura 4.17 são apresentados os consumos no sector dos transportes em PJ de todos os combustíveis seleccionados pelo modelo de 2010 a 2050 para o cenário base_GEE e biof_GEE, respectivamente. Verificar um aumento do consumo de electricidade, hidrogénio e bio FT-diesel até 2050 nos dois cenários, notando-se uma alteração estrutural no perfil energético de 2030. O aumento do consumo de bio FT-diesel para o cenário biof_GEE é mais significativo,

com um consumo de **81 PJ** em 2050, substituindo o biodiesel e o hidrogénio seleccionados no cenário “base_GEE”

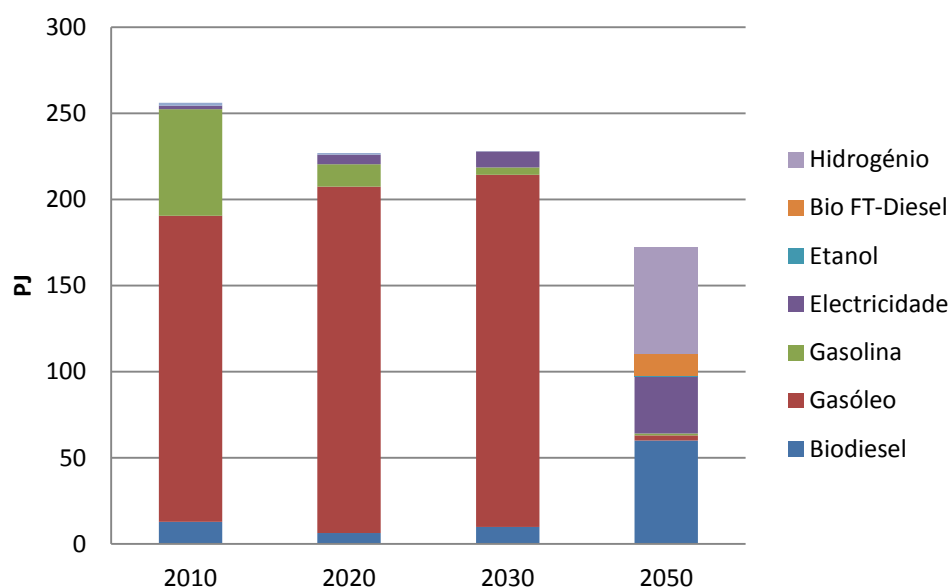


Figura 4.16- Consumo de energia final nos transportes em PJ de 2010 a 2050 para o cenário base_GEE.

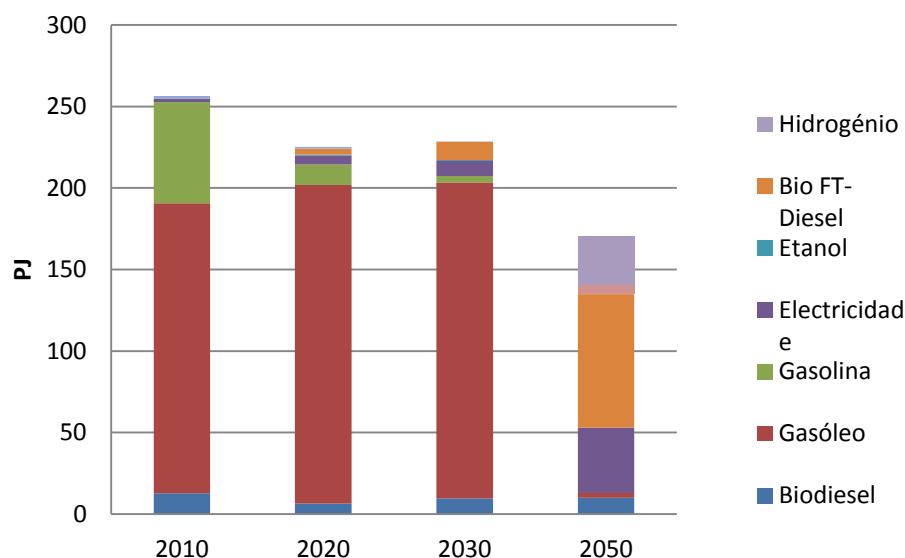


Figura 4.17 - Consumo de energia final nos transportes em PJ de 2010 a 2050 para o cenário biof_GEE.

O grau de penetração de cada combustível no sector dos transportes rodoviários de passageiros para o cenário **base_GEE** é demonstrado no gráfico da Figura 4.18 (à esquerda), onde se observa que em **2010** o gasóleo fornecia **metade** do transporte de passageiros, a gasolina fornecia **33%**, o biodiesel (em forma de combustível incorporado) fornecia 15%, e o

GPL fornecia 1%; em 2050 o cenário **base_GEE** projecta um fornecimento maioritariamente baseado em combustíveis alternativos, em que o biodiesel (1ªG) fornecerá **46%**, a electricidade 29%, o bio FT-diesel 20%, o hidrogénio 2%, a gasolina (fóssil) 2% e o etanol 1%. Isto representa uma substituição praticamente total dos combustíveis fósseis no sector do transporte rodoviário de passageiros até 2050 por biodiesel (1ªG), electricidade e bio FT-diesel. O grau de penetração de cada combustível no sector dos transportes rodoviários de passageiros para o cenário **biof_GEE** é demonstrado no gráfico da Figura 4.18 (à direita) onde se observa que em 2010 o fornecimento de combustíveis é igual ao cenário base_GEE e em 2050 o cenário **biof_GEE** projecta um fornecimento maioritariamente baseado em combustíveis alternativos, em que o biodiesel (1ªG) fornecerá 11%, a electricidade 39%, o bio FT-diesel 37%, o hidrogénio 2%, o biogás 11%. Isto representa uma substituição total dos combustíveis fósseis no sector do transporte rodoviário de passageiros até 2050 por biodiesel (1ªG), electricidade e bio FT-diesel, sendo que no cenário biof_GEE a electricidade e o bio FT-diesel fornecem mais 10,2% e 17%, respectivamente, e o biodiesel de 1ªG fornece menos 35,4% do sector dos transportes rodoviários de passageiros quando comparado com o cenário base_GEE.

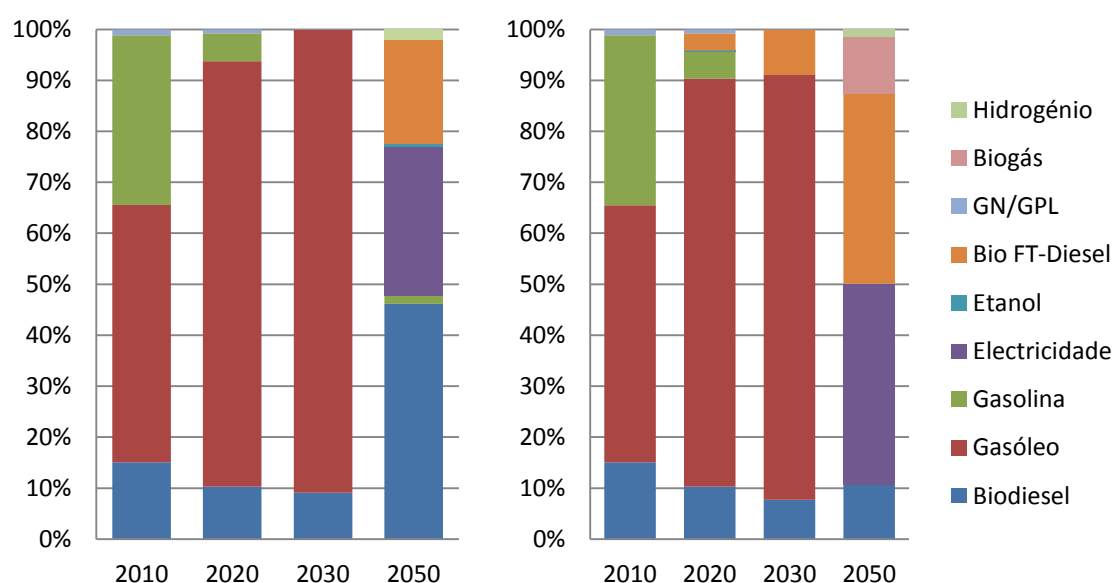


Figura 4.18 - Distribuição relativa dos passageiros transportados por tipo de combustível de 2010 a 2050 em Portugal- Cenário base_GEE (esquerda) e cenário biof_GEE (direita).

O grau de penetração de cada combustível no sector dos transportes rodoviários de mercadorias para o cenário **base_GEE** é demonstrado no gráfico da Figura 4.19 (à esquerda),

onde se observa que em 2010 o gasóleo fornecia 97,5% do fornecimento total para o transporte de mercadorias e o biodiesel (1ªG) (em forma de combustível incorporado) fornecia 2,5%; em 2050 o cenário **base_GEE** projecta um fornecimento maioritariamente baseado em combustíveis alternativos, em que o biodiesel (1ªG) fornecerá 14,%, o hidrogénio 81%, e a electricidade 5%. Isto representa uma substituição total dos combustíveis fósseis no sector do transporte rodoviário de mercadorias até 2050 por biodiesel (1ªG), hidrogénio e electricidade. O grau de penetração de cada combustível no sector dos transportes rodoviários de mercadorias para o cenário **biof_GEE** é demonstrado no gráfico da Figura 4.19 (à direita), onde se observa que em 2010 o fornecimento total para o transporte de mercadorias é igual ao cenário base_GEE e em 2050 o cenário **biof_GEE** projecta um fornecimento maioritariamente baseado em combustíveis alternativos, em que o biodiesel (1ªG) fornecerá 2,9%, o hidrogénio 39,7%, o bio FT-diesel 52,8% e a electricidade 4,6%. Isto representa uma substituição total dos combustíveis fósseis no sector do transporte rodoviário de mercadorias até 2050 por biodiesel (1ªG), bio FT-diesel, hidrogénio e electricidade.



Figura 4.19 - Distribuição relativa das toneladas de mercadorias transportadas por tipo de combustível de 2010 a 2050 em Portugal- Cenário base_GEE (esquerda) e cenário biof_GEE (direita).

O modelo TIMES_PT também projectou as emissões de GEE de 2010 a 2050 para cada sector económico, em Gg CO₂eq, onde se incluem os poluentes CO₂, CH₄ e N₂O. As emissões de GEE

projectadas para os dois cenários são muito semelhantes pelo que se apresenta as emissões de GEE por sector para o cenário **biof_GEE**, gráfico da Figura 4.20. É possível observar uma diminuição em todos os sectores excepto no sector da indústria, em que as emissões aumentam de 8508 Gg CO₂eq em 2009 para 9560 Gg CO₂eq em 2050; no sector dos transportes as emissões diminuem de 18862 Gg CO₂eq em 2009 para 1252 Gg CO₂eq em 2050, esta diminuição representando uma redução de cerca de **93%** das emissões de GEE no sector dos transportes de 2009 até 2050.

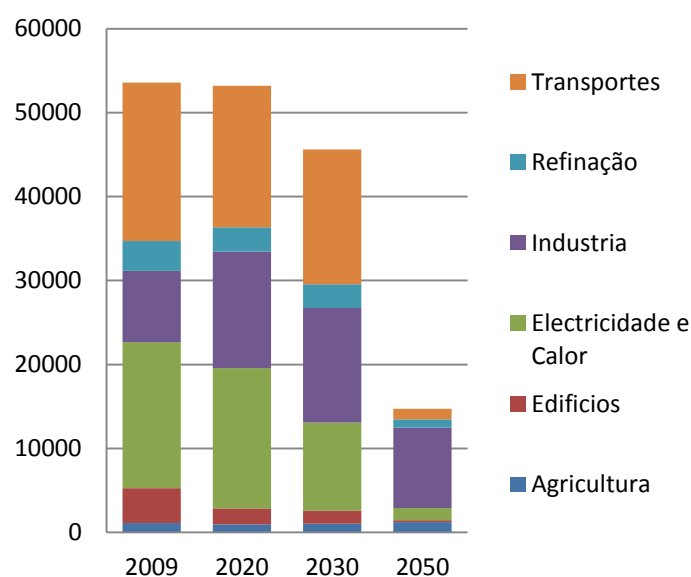


Figura 4.20 - Emissões de GEE por sector - cenário biof_GEE (Gg CO₂eq).

As emissões de GEE no sector dos transportes nos dois cenários são muito semelhantes, mas verifica-se uma redução das emissões no cenário **biof_GEE** em relação ao cenário **base_GEE**, demonstrado no gráfico da Figura 4.21 em que no cenário biof_GEE existe uma redução das emissões de GEE de cerca 3% CO₂eq, 5% Gg CO₂eq e 5% Gg CO₂eq em 2020, 2030 e 2050, respectivamente, que pode ser explicada pela introdução em grande escala da tecnologia de produção de bio FT-diesel, que representa um biocombustível de geração avançada que tem melhores desempenhos ambientais.

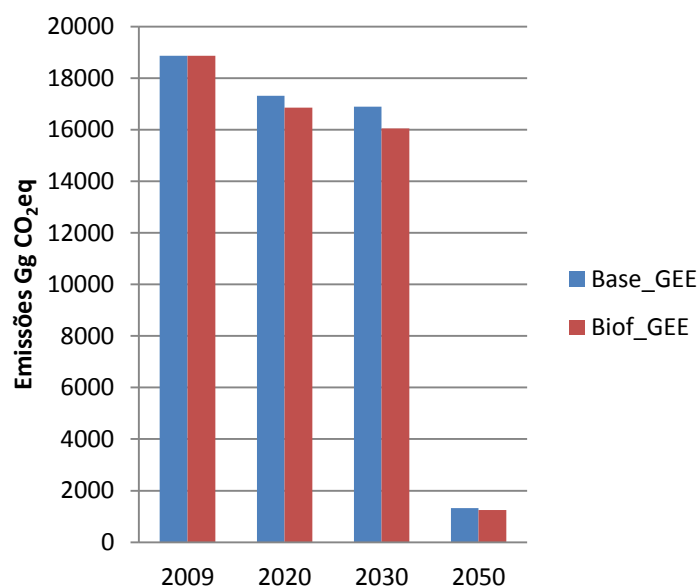


Figura 4.21 - Emissões de GEE no Sector dos Transportes nos 2 Cenários.

Os diferentes biocombustíveis analisados têm diferentes potenciais de implementação que se relacionam com o comportamento destes nas infra-estruturas e nos veículos. A “RENEW” efectuou um relatório em conjunto com várias entidades produtoras de biocombustíveis para fazer uma análise do desempenho destes em relação aos combustíveis fósseis, no que diz respeito ao seu funcionamento mecânico nos motores e infra-estruturas. Sendo o FT-diesel o biocombustível seleccionado pelo modelo TIMES_PT para ser utilizado no sector dos transportes é relevante saber qual o seu desempenho a nível das infra-estruturas e nos motores dos veículos. Na Figura 4.22 está uma matriz de avaliação da adequação dos biocombustíveis onde há uma comparação do FT-diesel, do etanol, do DME e do SNG (biogás) com os combustíveis convencionais. Nesta comparação verifica-se que o FT-diesel tem vários aspectos positivos em comparação aos combustíveis convencionais e a outros combustíveis alternativos, apresentando vantagens, no potencial de redução de emissões, da adequação com as tecnologias modernas de tratamento de gases de escape, no arranque a frio, na possibilidade de mistura com combustíveis convencionais e na capacidade de utilização de infra-estruturas e veículos existentes e apresentando-se neutro nos restantes critérios, indicado uma óptima adequação deste biocombustível no sistema de transportes.

Matriz de avaliação da adequação dos biocombustíveis

Crítérios de Avaliação	Comparado a	FT-Diesel	Etanol	DME	SNG
Potencial de redução de emissões	Comb.Conv.	++	+	++	+
Potencial de redução de consumo de combustível	Comb.Conv.	0	0	+	0
Adequação c/ tecnologias de tratamento dos gases	Comb.Conv.	++	0	+	-
Adequação a processos de combustão avançados	Comb.Conv.	0	não testado	+	não testado
Dirigibilidade					
Arranque a frio, comportamento em climas frios	Comb.Conv.	++	-	+	+
Comportamento em climas quentes	Comb.Conv.	+	-	+	0
Deposição de resíduos	Comb.Conv.	+	-	+	+
Compatibilidade com materiais					
Compatibilidade com polímeros	Comb.Conv.	0	0	+	0
Corrosão	Comb.Conv.	0	-	-	0
Lubrificação e abrasão	Comb.Conv.	0	0	-	0
Propriedades de armazenamento					
Densidade energética	Comb.Conv.	0	-	-	--
Carga	Comb.Conv.	0	-	-	--
Distância percorrida	Comb.Conv.	0	-	-	--
Infra-estruturas					
Misturas com combustíveis convencionais	Outros combustíveis alternativos	++	+	⊗⊗	⊗⊗
Infra-estrutura adicional necessária		não	não	sim	sim
Veículos especiais		não	não	sim	possível
Aspectos ambientais e de segurança					
Biodegradabilidade	Comb.Conv.	0	+	gasoso	gasoso
Inflamabilidade e risco de explosão	Comb.Conv.	0	0	--	--
Toxicidade	Comb.Conv.	0	+	+	+

Figura 4.22 - Matriz de avaliação da adequação dos biocombustíveis. (Fonte: adaptado de 65)

4.5. Barreiras à implementação dos biocombustíveis

Um dos principais obstáculos à implementação em larga escala dos biocombustíveis é a sua competitividade em termos de custos em relação aos combustíveis fósseis. Melhorar as eficiências de conversão e reduzir os custos de investimento e operação contribuirá para uma diminuição da diferença de custos entre os biocombustíveis e os combustíveis convencionais. Para além disso a implementação dos biocombustíveis avançados tem muitos obstáculos a ultrapassar, tal como, o número de tecnologias de conversão de biomassa em biocombustíveis existentes ser muito diferenciado e apenas estar presente em fase de demonstração ou em pequena escala e o facto da grande variedade de matérias-primas disponíveis para produção de biocombustíveis criar algum nível de incerteza e nem todas terem exploradas o seu potencial total.

Nem todos os biocombustíveis avançados a serem investigados e produzidos podem ser utilizados nas infra-estruturas existentes actualmente para os combustíveis convencionais o que obriga a uma criação de infra-estruturas específicas. A produção de biocombustíveis em larga escala cria exigências significativas em quantidades de área e de água e tem impactes

ambientais que têm de ser analisados em comparação aos benefícios criados pela utilização de biocombustíveis; o grande número de matérias-primas disponíveis cria também alguma incerteza do impacto real da produção de biocombustíveis. A utilização da biomassa para o fornecimento energético pode ter impactos económicos noutros sectores, como o sector alimentar, e os efeitos indirectos da alteração dos usos do solo podem resultar num aumento de emissões de GEE superior á redução obtida pela utilização dos biocombustíveis. É preciso uma promoção eficaz dos novos veículos e infra-estruturas que utilizarão os biocombustíveis para que haja uma boa penetração no mercado, que tem de ser feita com as políticas e ferramentas correctas. Em suma, existem obstáculos de natureza tecnológica, logística, económica, política, de disponibilidade de matérias-primas, de sustentabilidade e de ambiente.

5. Conclusões

Os biocombustíveis avançados constituem uma opção com grande potencial para a transição eficaz para uma economia de baixo carbono. Existem muitas opções para a redução das emissões de GEE do sector dos transportes rodoviários, tanto a nível de potencial de disponibilidade de matérias-primas, tecnologias ou potencial de implementação. As novas tecnologias de produção de biocombustíveis avançados ainda são pouco maduras existindo alguma incerteza quanto ao potencial real de cada uma delas. A presente dissertação tem como objectivo sistematizar o estado da arte quanto às tecnologias de produção de biocombustíveis avançados e realizar uma análise exploratória de cenários futuros para Portugal, gerados pelo modelo TIMES_PT no que se refere ao seu potencial custo-eficaz para o sistema energético

Na análise das diferentes tecnologias avançadas, e tendo em conta os potenciais de matérias-primas disponíveis, verificou-se que existe um grande potencial de aproveitamento de biomassa e de licores negros para a produção de biocombustíveis avançados. Os biocombustíveis, como o bioetanol e o bio-DME, não foram seleccionados pelo modelo pois actualmente ainda não são custo-eficazes, mas têm um grande potencial inerente dada a disponibilidade de matérias-primas para a sua produção a baixo custo.

A gasificação mostrou ser uma tecnologia com grande potencial de implementação, pois já se encontra em fase de demonstração em escalas de maior dimensão e com a utilização de um grande número de matérias-primas para produção de diferentes biocombustíveis avançados, criando uma diversificação das fontes energéticas para o sector dos transportes. Para alguns biocombustíveis, como o FT-diesel e o etanol, não são precisas alterações significativas nas infra-estruturas e veículos existentes e embora outros biocombustíveis avançados demonstrassem uma exigência de alteração destas componentes, a sua implementação é possível com as ferramentas correctas de promoção e a formulação de políticas adequadas. Em suma, a gasificação de biomassa e licores negros para a produção de biocombustíveis avançados mostrou ser uma tecnologia vencedora em relação ao potencial de implementação.

Uma grande vantagem dos biocombustíveis avançados é a produção sustentável de matérias-primas para que não interfiram com outros sectores, desta maneira contraria-se o problema

de competição a produção de alimento e criam-se novas formas de fornecimento energético sustentável. Para que todo o ciclo de vida destes biocombustíveis avançados seja sustentável são necessárias formas de monitorizar e fiscalizar todas as etapas de produção.

Na análise dos potenciais de matéria-prima disponível constatou-se que Portugal possui um grande potencial no que diz respeito a fontes de matéria-prima endógena. A nível de culturas dedicadamente energéticas Portugal tem **17% a 31%** de todo o território disponível para estabelecer estas culturas de forma sustentável, com os custos de produção mais baixos da Europa, de **1,24€/GJ a 2,45€/GJ**, que em outras zonas da Europa ultrapassa os **4,5€/GJ**. No sul de Portugal pode verificar-se um potencial de biomassa disponível, em termos de áreas para culturas dedicadamente energéticas, de **18 GJ/ha a 28 GJ/ha** por ano e de **2 GJ/ha a 4 GJ/ha** por ano para resíduos agrícolas, que também são dos melhores potenciais a nível europeu. Em termos de potencial teórico máximo em 2050 de biomassa florestal, de resíduos agrícolas e de resíduos da indústria de transformação da madeira Portugal dispõe de **36,8 PJ** anuais em 2050, para os RSU Portugal dispõe de um potencial teórico máximo de cerca de **10 PJ** anuais até 2050 e a produção de licores negros em Portugal em 2001 contabilizava **33,2 PJ**, que poderia satisfazer 10% do sector dos transportes com a produção de biocombustíveis. Assim, verifica-se que o potencial de matérias-primas disponíveis em Portugal é bastante significativo e que com as medidas e ferramentas adequadas. Portugal poderá tornar-se um grande produtor de biocombustíveis com matérias-primas endógenas, que poderá satisfazer uma parte considerável da procura de combustíveis interna.

Foram analisados 2 cenários futuros para o sistema energético português até 2050, em que ambos consideram aqueles valores de potencial endógeno, e uma redução de emissões de gases com efeito de estufa de 70% em 2050, face aos valores registados em 1990, o que configura uma economia de baixo carbono no longo prazo. Num dos cenários, é imposta como condição a não importação de biocombustíveis, com o objectivo de avaliar se as opções tecnológicas de produção de biocombustíveis avançados são competitivas face às opções actuais. O modelo TIMES_PT seleccionou principalmente a produção de bio FT-diesel a partir tecnologia de gasificação da biomassa e a produção de biogás a partir da tecnologia de gasificação dos licores negros, que apresentaram resultados satisfatórios em termos da produção e consumo destes biocombustíveis com valores produção de **81 PJ** e de **71 PJ** em 2050, respectivamente, para o bio FT-diesel e para o biogás, indicando uma viabilidade a longo

prazo destas tecnologias e diversificando assim as fontes de recursos energéticos. Assim, verificou-se que a implementação de tecnologias de gasificação de biomassa para a produção de FT-diesel para abastecer o sector dos transportes em Portugal é viável e pode trazer benefícios ambientais e económicos para o país.

As tecnologias seleccionadas pelo modelo são as mais custo-eficazes e, portanto, competitivas, as restantes tecnologias apesar de não terem sido seleccionadas podem futuramente vir a sofrer um desenvolvimento a nível económico e tecnológico que permita a sua adopção. A produção de biocombustíveis a partir das algas parece ser muito promissora, visto os seus grandes rendimentos energéticos por área de produção e o seu desempenho ambiental, mas dado o seu estado embrionário e a falta de informação não foi possível modelar e analisar nesta dissertação o potencial futuro desta matéria-prima.

Em trabalhos futuros seria interessante fazer:

Uma análise em termos económicos sobre a construção de uma fábrica de produção de FT-diesel em Portugal, calculando períodos de retorno dos investimentos efectuados e o seu impacto na redução das importações de petróleo face à produção do biocombustível.

Um estudo económico detalhado da implementação de uma biorefinaria para produção de biocombustíveis nas fábricas de produção de pasta de papel, com o objectivo de aproveitamento dos licores negros.

Uma análise exploratória de cenários futuros que incluíssem na base de dados do modelo as características tecno-económicas da produção de biocombustíveis avançados a partir de algas.

Uma comparação detalhada entre a implementação de biocombustíveis versus a implementação do veículo eléctrico em diferentes escalas.

6. Bibliografia

- [1] Gül, T. (2007). *"An energy-economic scenario analysis,"* PhD dissertation University of Stuttgart, Germany, 229pp.
- [2] Naqvi, M. R. (2012). *"Analysing performance of bio-refinery systems by integrating black liquor gasification with chemical pulp mills",* KTH Royal Institute of Technology, School of Chemical Science and Engineering, Sweden, 85 pp.
- [3] *"World history for us all,"* [Online]. Disponível em:
<http://worldhistoryforusall.sdsu.edu/eras/era9.php>. [Acedido em 18 Janeiro 2013].
- [4] European Commission. (2006). *"Biofuels in the European Union - A vision for 2030 and beyond",* Directorate-General for Research EC, Luxembourg, 39 pp.
- [5] Arumugan, S., Zinoviev, S. (2007). *"Background Paper on Biofuel Production Technologies",* International Centre for Science and High Technology - United Nations Industrial Development Organization, Italy, 106 pp.
- [6] European Commission. (2010). *"EU energy and transport in figures",* European Commission, Luxembourg.
- [7] International Energy Agency - Renewable Energy Division. (2011). *"Technology Roadmap Biofuels for Transport",* International Energy Agency, France, 56 pp.
- [8] Nattrass, L., Smith, C. e Evans, G. (2011). *"Advanced Biofuels: the potential for a UK industry",* NNFCC, UK, 69 pp.
- [9] Sims, R., Taylor, M., Saddler, J. e Mabee, W. (2008). *"FROM 1st TO 2nd GENERATION BIOFUEL TECHNOLOGIES An overview of current industry and RD&D activities",* International Energy Agency, France, 124 pp.
- [10] The Regents of the University of California. (2011). *"SUSTAINABLE TRANSPORTATION ENERGY PATHWAYS - A Research Summary for Decision Makers",* Institute of Transportation Studies - University of California, USA, California, 25 pp.
- [11] European Commission. (2011). *"2011 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) Technology Descriptions",* European Commission, Luxembourg, 178 pp.
- [12] Flach, B., Bendz, K. e Lieberz, S. (2012). *"EU-27 Biofuels Annual 2012,"* Global Agricultural Information Network, USA, 35 pp.

- [13] Cheng, J. J., e Timilsina, G. R. (2010). *"Advanced Biofuel Technologies - Status and Barriers"* The World Bank - Development Research Group, USA, North Carolina, 47pp.
- [14] Simbolotti, G. (2012). "Production of Liquid Biofuels," IEA-ETSAP.
- [15] Frost, M. "Frost's meditations," [Online]. Disponível em:
http://www.martinfrost.ws/htmlfiles/aug2008/biofuel.html#Liquid_fuels_for_transportation. [Acedido em 15 Fevereiro 2013].
- [16] Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Garielle, B., Lucht, W., Mapako, M., Cerutti, O. M., McIntyre, T., Minowa, T. e Pingoud, K. (2011). *"Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation"*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 126 pp.
- [17] Energy Efficiency & Renewable Energy - BIOMASS PROGRAM. (2012). *"Biochemical Conversion: Using Hydrolysis, Fermentation, and Catalysis to Make Fuels and Chemicals"* U.S. Department of Energy, USA.
- [18] Energy Efficiency & Renewable Energy - BIOMASS PROGRAM. (2012). *"Thermochemical Conversion: Using Heat and Chemistry to Make Fuels and Bioproducts,"* U.S. Department of Energy, USA.
- [19] U.S. Environmental protection Agency. (2011). *"Biofuels and the Environment: First Triennial Report to Congress," Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment"* Washington, DC, 220 pp.
- [20] Ree, R. e Annevelink, B. (2007). *"Status Report Biorefinery 2007"* Agrotechnology and Food Sciences Group, AA Wageningen, Netherlands, 110 pp.
- [21] Moore, A. (2008). *"Biofuels are dead: long live biofuels(?) - Part One"*, Elsevier, Heidelberg, Germany.
- [22] Benneman, J. R. (2008). *"Overview: Algae Oil to Biofuels"*, em *NREL Workshop, Algae Oil for Jet Biofuel Production*, Arlington, USA.
- [23] Kowalski, S. C., (2010). *"Análise da Viabilidade Técnica e Econômica da Cultivo de Microalgas para Produção de Biodiesel Estudo de Caso Paran gua- Estado do Paraná"*, PhD, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, Brasil, 108 pp.
- [24] U.S. Department of Energy, (2010). *"National Algal Biofuels Technology Roadmap"*, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, USA, 140 pp.
- [25] Energy Information Administration. (2007). *"Methodology for Allocating Municipal Solid*

Waste to Biogenic and Non-Biogenic Energy", U.S. Department of Energy , Washington,DC, USA.

- [26] European Biofuels Tecnology Platform. (2011). *"Biofuel Fact Sheet - Dimethyl ether DME"*, EBTP.
- [27] Farrell A. E., e Sperling, D. (2007). *"A Low-Carbon Fuel Standard for California Part 1: Technical Analysis"*, Daniel Sperling, University of California, 179 pp.
- [28] *"Make Biodiesel"*, [Online]. Disponível em:
<http://make-biodiesel.org/Ingredients/methanol-for-biodiesel.html>. [Acedido em 16 Fevereiro 2013].
- [29] Ekbohm, T., Berglin, N. e Logdberg, S. (2005). *"Black Liquor Gasification with Motor Fuel Production - BLGMF II - A techno-economic feasibility study on catalytic Fischer-Tropsch Synthesis for synthetic diesel production in comparison with methanol and DME as transport fuels"*. Swedish Energy Agency - Nykomb Synergetics AB, Stockholm, Sweden, 260 pp.
- [30] Compagne, P. (2011). *"Bio-methanol, the other biofuel,"* em *Bio MCN*, Paul Compagne.
- [31] European Biofuels Tecnology Platform. (2011). *"Biofuel Fact Sheet - Ethanol,"* European Biofuels Technology Platform, 2011.
- [32] OriginOil. (2008). *"Origin Oil"*. [Online]. Disponível em: <http://www.originoil.com/about-algae/algae-oil-basics.html>. [Acedido em 4 Fevereiro 2013].
- [33] Charles, S., Roberts, M. e McKinney, J. (2011). *"2011-2012 Investment Plan for the Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program. Commision Report"*, California Energy Commision - Fuels and Transportation Division, California, USA 185 pp.
- [34] *"About.com"* [Online]. Disponível em:
<http://alternativefuels.about.com/od/blends/a/blends101.htm>. [Acedido em 7 Janeiro 2013].
- [35] BEST. *"BEST - BioEthanol For Sustainable Transport"* [Online]. Disponível em:
<http://www.best-europe.org/Pages/ContentPage.aspx?id=117>. [Acedido em 13 Novembro 2012].
- [36] US Department of Energy, *"fueleconomy.gov"* [Online]. Disponível em:
<http://www.fueleconomy.gov/feg/flextech.shtml>. [Acedido em 21 Janeiro 21013].
- [37] *"Cars direct"* (2010). [Online]. Disponível em: <http://www.carsdirect.com/green-cars/flex->

- fuel-vehicles-advantages-and-disadvantages. [Acedido em 22 Janeiro 2013].
- [38] Rutz, D. e Janssen, R. (2007). *"Biofuel Technology Handbook"*, WIP Renewable Energies, Germany, 149 pp.
- [39] Johnson, F. X., Pacini, H. e Smeets, E. (2012). *"Transformations in EU biofuels markets under the Renewable Energy Directive and the implications for land use, trade and forests"* Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia, 69 pp.
- [40] "European Commission," [Online]. Disponível em:
http://ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/biofuels_en.htm. [Acedido em 1 Março 2013].
- [41] Gírio, F., Matos, C. e Oliveira, C. (2010). *"BIOCOMBUSTÍVEIS & Sustentabilidade: Oportunidades Nacionais 2011-2020"* em *Apresentação LNEG - Portugal Tecnológico*, Lisboa.
- [42] Bianchi-de-Aguiar, F. e Pereira, H. (2010). *"Biocombustíveis em Portugal"* em *Workshop Internacional - As Biorrefinarias de Biomassa para Biocombustíveis: Sustentabilidade & Importância Socio-Económica*, LNEG.
- [43] "Ambiente Online" (2010). [Online]. Disponível em:
<http://www.ambienteonline.pt/noticias/detalhes.php?id=9401>. [Acedido em 14 Fevereiro 2013].
- [44] European Biofuels Technology Platform. (2008). *"European Biofuels Technology Platform: Strategic Research Agenda & Strategy Deployment Document"*. CPL Scientific Publishing Services Ltd, UK, 34 pp
- [45] "About.com" [Online]. Disponível em:
<http://saveenergy.about.com/od/alternativeenergysources/g/bioenergy.htm>. [Acedido em 25 Janeiro 2013].
- [46] Hamelinck, C., Koper, M., Berndes, G., Englund, O., Diaz-Chavez, R., Kunen, E. e Walden, D. (2008). *"Biofuels Baseline"* Ecofys, 553 pp.
- [47] REN21. (2012). *"Renewables 2012 Global Status Report"*. REN21 Secretariat, Paris, 176 pp.
- [48] Vessia, O. (2005). *"Biofuels from lignocellulosic material - In the Norwegian context 2010 - Technology, Potential and Costs"*. PhD. Norwegian University of Science and Technology, Norway, 101 pp.
- [49] Held, J. (2012). *"Gasification - Status and technology"* Swedish Gas Centre, Sweden, 48 pp.

- [50] Zinoviev, S., Muller-Langer, F., Das, P., Bertero, N., Fornasiero, P., Kaltschmitt, M., Centi, G., e Miertus, S. (2010). *"Next-Generation Biofuels: Survey of Emerging Technologies and Sustainability Issues"*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, 29 pp.
- [51] Franco, C. (1989). *"Gasificação Pirolítica de Resíduos de Madeira"*. PhD. DEC/LNETI.
- [52] Clark, J., Li, Q., Lilik, G., Reed, N. e Wang, C. (2007). *"Novel Design of an Integrated Pulp Mill Biorefinery for the Production of Biofuels for Transportation"* EGEE 580, 105 pp.
- [53] *"Frontline Bioenergy"* [Online]. Disponível em:
http://www.frontlinebioenergy.com/en/current_news/frontline_news_press_releases/index.cfm?action=display&newsID=4303. [Acedido em 10 Novembro 2012].
- [54] North Energy and COPE Ltd. (2009). *"Technical and Economic Assessment of Thermal Processes for Biofuels"*, NNFCC, COPE Ltd, UK, 31 pp.
- [55] "National Energy Technology Laboratory," NETL, [Online]. Disponível em:
http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-1_types.html. [Acedido em 7 Março 2013].
- [56] Panwara, N., Kotharib, R. e Tyagic, V. (2012). *"Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, ELSEVIER, 2012, 16 pp
- [57] GDE Black and Veatch. (2008). *"Lignocellulosic Ethanol Plant in the UK - Feasibility Study - Final Repor,"* Black & Veatch Ltd, 139 pp.
- [58] Cragnell, J., Green, K., Holmberg, A., Karlsson, M. e Mönegård-Jakobsson, N. (2009). *"Evaluation of processes for conversion of biomass-to-fuels using biochemical versus thermo-chemical processes"* Dept Chemical Engineering, Lund Institute of Technology, Sweden, 2009, 54 pp.
- [59] California Air Resources Board. (2009). *"Proposed Regulation to Implement the Low Carbon Fuel Standard"* California Environmental Protection Agency, USA, 332 pp.
- [60] E4Tech. (2009). *"Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes"* NNFCC, 130 pp.
- [61] Kaneko, T., Derbyshire, F., Makino, E., Gray, D. e Tamura, M. (2011). *"Coal Liquefaction in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry"* Wiley-VCH, Germany.
- [62] O'Connor, D. (2011). *"Algae as a Feedstock for Biofuels: An Assessment of the Current Status and Potential for Algal Biofuels Production"*. Consultants Inc., Canada, 23 pp.

- [63] Osburn, L. e Osburn, J. "*Biomass Resources for Energy and Industry*" [Online]. Disponível em: <http://www.ratical.org/renewables/biomass.html>. [Acedido em 9 Março 2013].
- [64] Yang, B., Dai, Z., Ding, S.Y., e Wyman, C. E. (2011). "*Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass*". Future Science Group.
- [65] Ponec, V. (1978). "*Some Aspects of the Mechanism of Methanation and Fischer-Tropsch Synthesis*". Catalysis Reviews: Science and Engineering, 1978.
- [66] Sudiro, M. e Bertucco, A. (2010). "*Synthetic Natural Gas (SNG) from coal and biomass: a survey of existing process technologies, open issues and perspectives*". Department of Chemical Engineering (DIPIC), University of Padova, Italy 23 pp.
- [67] Åström, M., Collin, M., Landälv, I., Gebart, R. e Kignell, J. E. (2010). "Gasification of Black Liquor," RC tryck AB.
- [68] Naqvi, M., Yan, J. e Fröling, M. (2009). "*Bio-refinery system of DME or CH₄ production from black liquor gasification in pulp mills*". Bioresource Technology, Volume 101, ELSEVIER Ltd, 8 pp.
- [69] Chemrec. (2010) "*The Pulp Mill Biorefinery*" em *Chemrec Company Presentation*.
- [70] Ekblom, T., Lindblom, M., Berglin, N. e Ahlvik, P. (2003). "*Technical and Commercial Feasibility Study of Black Liquor Gasification with Methanol/DME Production as Motor Fuels for Automotive Uses - BLGMF*" Altener, Sweden, 293pp.
- [71] RENEW. (2008) "*Renewable Fuels for advanced Powertrains*". SYNCOM, 177 pp.
- [72] Naqvi, M., Yan, J. e Dahlquist, E. (2010). "*Bio-refinery system in a pulp mill for methanol production with comparison of pressurized black liquor gasification and dry gasification using direct causticization*". Applied Energy, Volume 90, ELSEVIER Ltd, 8 pp
- [73] Naqvi, M., Yan, J. e Dahlquist, E. (2012). "*Energy conversion performance of black liquor gasification to hydrogen production using direct causticization with CO₂ capture*" Bioresource Technology, Volume 110, ELSEVIER, 2012. 8 pp
- [74] LeBlanc, R. J. "*Biomass Magazine*" [Online]. Disponível em: <http://biomassmagazine.com/articles/2818/black-liquor-gasification-can-help-sustain-forests-generate-ultra-clean-biofuels>. [Acedido em 12 Novembro 2012].
- [75] Initiative, W. B. D. "*BioRefine*" [Online]. Disponível em: www.biorefine.org/proc/blackliquorgas.pdf. [Acedido em 14 Novembro 2012].
- [76] Lopes, H. (2009) "*Bioenergia e Biocombustíveis*". LNEG. Lisboa.

- [77] Wang, T., Chang, J., Fu, Y., Zhang, Q. e Li, Y. (2006). *"An integrated biomass-derived syngas/dimethyl ether process"*. Biomass Research Center, China, 5 pp.
- [78] Huisman, G., Rens, G. V., Lathouder, H. D. e Cornelissen, R. (2010). *"Cost estimation of biomass-to-fuel plants producing methanol, dimethylether or hydrogen"*. Biomass and Bioenergy, Volume 35, Supplement 1, ELSEVIER Ltd, 12 pp.
- [79] IATA. (2009). *"2nd Generation Biomass Conversion Efficiency"*. McGill University & IATA, 74pp.
- [80] Hertwich E. e Zhang, X. P. (2009). *"Concentrating-Solar Biomass Gasification Process for a 3rd Generation Biofuel"*. Norwegian University of Science and Technology, Norway, 6 pp.
- [81] Spath, P., Aden, A., Eggeman, T., Ringer, M., Wallace, B. e Jechura, J. (2005). *"Biomass to Hydrogen Production Detailed Design and Economics Utilizing the Battelle Columbus Laboratory Indirectly-Heated Gasifier"* National Renewable Energy Laboratory, USA, 161 pp.
- [82] Bienert, K. (2007). *"The status of the Choren Carbo V gasification"* em *2nd European Summer School on Renewable Motor Fuels*, Poland, 2007.
- [83] CHOREN. (2008). *"Choren Industries Beta Plant experience and lessons learnt so far"* Germany.
- [84] National Energy Technology Laboratory. (2009). *"Affordable, Low-Carbon Diesel Fuel from Domestic Coal and Biomass"* NETL, USA , 126 pp.
- [85] Moore, J. (2011). *"Wood properties and uses of Sitka spruce in Britain"* Forestry Commission, Edinburgh, UK, 60 pp.
- [86] Cozens, P. e Manson-Whitton, C. (2010). *"Bio-SNG Feasibility Study. Establishment of a Regional Project"*. Progressive Energy & CNG Services, 99 pp.
- [87] International Energy Agency. (2012). *"Tracking Clean Energy Progress - Energy Technology Perspectives 2012 excerpt as IEA input to the Clean Energy Ministerial"* OECD/IEA, France, 82 pp.
- [88] Deloitte. (2011). *"Advanced Biofuels: the potential for a UK industry Appendix 5 Economic Analysis of Advanced Biofuels in the UK"* Deloitte LLP, 35 pp.
- [89] *"Enerkem"* [Online]. Disponível em:
<http://enerkem.com/en/technology-platform/process.html>. [Acedido em 16 Janeiro 2013].
- [90] Enerkem. (2010). *"MSW to Ethanol - Project Progress"* em *Revolutionizing waste and transportation fuels locally and globally*. Company presentation. Canada.

- [91] “*Fulcrum Bioenergy*” [Online]. Disponível em:
<http://www.fulcrum-bioenergy.com/process.html>. [Acedido em 22 Outubro 2012].
- [92] Energy Information Administration. (2007). “*Methodology for Allocating Municipal Solid Waste to Biogenic and Non-Biogenic Energy*” U.S. Department of Energy, USA.
- [93] IEA. “*IEA Task 33*” [Online]. Disponível em: <http://www.ieatask33.org/>. [Acedido em 26 Novembro 2012].
- [94] “*Photobioreactor*” [Online]. Disponível em:
<http://www.et.byu.edu/~wanderto/homealgaeproject/Photobioreactor.html>. [Acedido em 12 Março 2013].
- [95] “*E&E Publishing LLC*” [Online]. Disponível em:
<http://www.eenews.net/public/climatewire/2010/07/22/1>. [Acedido em 14 Março 2013].
- [96] REN21. (2013). “*Renewables Global Futures Report 2013*” REN21, Paris, 76 pp.
- [97] “*European Environment Agency*” [Online]. Disponível em: <http://www.eea.europa.eu/>. [Acedido em 17 Fevereiro 2013].
- [98] Eisentraut, A. (2010). “*Sustainable Production of Second-Generation Biofuels - Potential and perspectives in major economies and developing countries*” OECD/IEA, France.
- [99] German National Academy of Sciences. (2012). “*The current status of biofuels in the European Union, their environmental impacts and future prospects*” EASAC Secretariat, Germany.
- [100] “*Green Savers*” [Online]. Disponível em: <http://greensavers.sapo.pt/2012/02/05/galp-e-adene-vao-produzir-biocombustiveis-de-segunda-geracao-em-mocambique/>. [Acedido em 19 Fevereiro 2013].
- [101] “*Green Savers*” [Online]. Disponível em: <http://greensavers.sapo.pt/2012/02/10/Ineg-apoia-projecto-de-biocombustiveis-de-terceira-geracao/>. [Acedido em 19 Fevereiro 2013].
- [102] “*BLC 3*” [Online]. Disponível em: <http://www.blc3.pt/>. [Acedido em 18 Março 2013].
- [103] “*Biotecnologia Portugal*,” [Online]. Disponível em:
<http://biotecnologiaportugal.wordpress.com/category/biodiesel/>. [Acedido em 19 Fevereiro 2013].
- [104] Wit, M. e Faaij, A. (2008). “*Biomass Resources Potencial and Related Costs - Assessment of the EU-27, Switzerland, Norway and Ukraine*” REFUEL, Netherlands, 59 pp.
- [105] Seixas, J., Dinis, R., Alves, B., Baptista, P., Fortes, P., Dias, L., Simões, S. e Gouveia, J. P.

(2012). *“Roteiro Nacional de Baixo Carbono - Modelação de gases com efeito de estufa: Energia e Resíduos”* Comissão para as Alterações Climáticas, 78 pp.

[106] Instituto Nacional de Estatística. (2012). *“Estatísticas dos Transportes 2011”* Instituto Nacional de Estatística, I.P., Lisboa, 206 pp.

[107] *“Dead Tree Edition”* [Online]. Disponível em:
<http://deadtreeedition.blogspot.pt/2010/10/how-democrats-helped-finance-tea-party.html>. [Acedido em 24 Fevereiro 2013].